DESCUBRIMIENTO DE NEPTUNO • ORIGEN DE LA MANO HUMANA

INVESTIGACION y CIENCIA

FEBRERO 2005
6,00 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

¿TIENEN VIDA LOS VIRUS?



MAREAS INTERNAS Y TALUD CONTINENTAL

OPTICA Y REALISMO EN EL ARTE RENACENTISTA

DINOSAURIOS ARTICOS DE ALASKA

MECANISMOS QUIMICOS DE DEFENSA EN LAS PLANTAS

00341
9 770210 136004



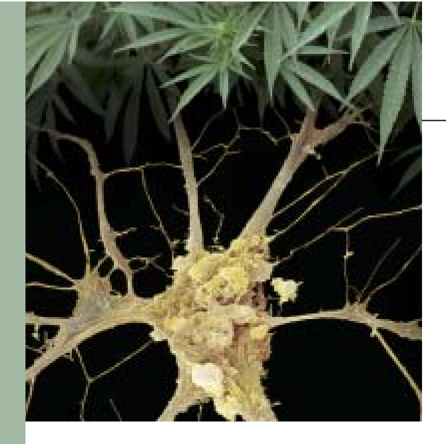
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

Febrero de 2005

Número 341



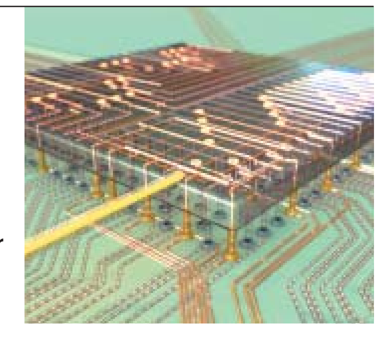






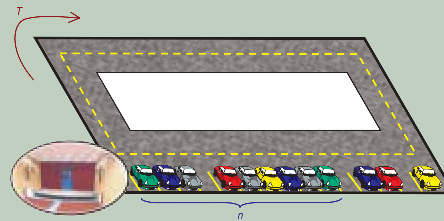


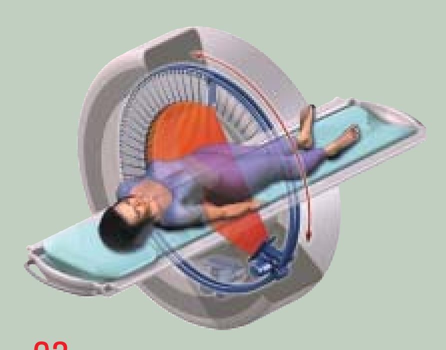


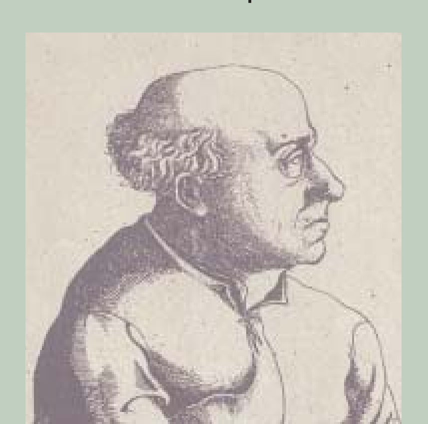














DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN John Sargent

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

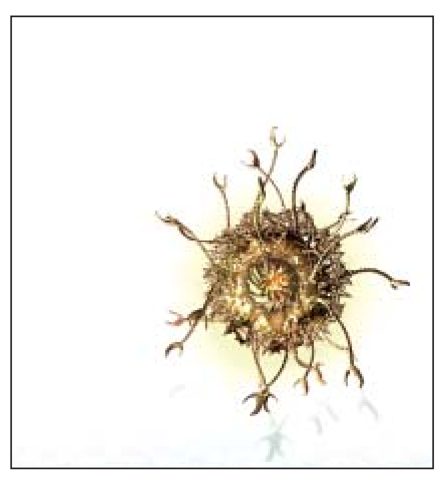
Madrid:
GM Exclusivas Publicidad
Menorca, 8, Bajo, Centro Izda.
28009 Madrid
Tel. y Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *Endocannabinoides cerebrales*; Carlos Lorenzo: *Dinosaurios árticos de Alaska*; José Chabás: *El descubrimiento de Neptuno*; Felipe Cortés: *¿Tienen vida los virus?*; Manuel Puigcerver: *Mareas internas y talud continental*; J. Vilardell: *Hace...*, e *Ideas aplicadas*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*



Portada: Jean-Francois Podevin

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Extranjero	90,00 euro	170,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



...cincuenta años

Cámara de burbujas. «En su exploración del mundo submicroscópico de los núcleos atómicos, los físicos parece que anden a tientas con una linterna en una caverna oscura. De gran ayuda les sería un foco más potente. Los químicos físicos saben desde hace tiempo que, en el interior de un recipiente limpio de paredes lisas, es posible calentar un líquido de gran pureza por encima de su punto de ebullición sin que hierva. Me pregunté si una partícula en vuelo podría, en las condiciones adecuadas, desencadenar la formación de las burbujas microscópicas que inician el proceso de ebullición. De ser así, podría dejar un rastro visible en el líquido supercalentado. —Donald A. Glaser» [*Nota de la redacción: a Glaser le fue concedido el premio Nobel de Física de 1960 por inventar la cámara de burbujas.*]

La polémica de la fluoración. «Un gran número de personas, sobre todo científicos, creen que en EE.UU. estamos padeciendo una epidemia nacional de irracionalidad —lo que el senador por Arkansas J. W. Fulbright ha denominado la 'sórdida plaga del anti-intelectualismo'. La fluoración del abastecimiento de aguas públicas ha sido recomendada por una extensa lista de organizaciones científicas. Sin embargo, el proyecto tuvo sus oponentes desde el mismo inicio. La argumentación contra la fluoración se basa en tres puntos: 1. la fluoración es un experimento de validez no probada que puede esconder peligros desconocidos; 2. los fluoruros son tóxicos; 3. el tratamiento del agua por organismos públicos constituye un paso hacia la socialización de la medicina y una invasión de los derechos individuales.»

...cien años

Nuestra cálida Tierra. «Observa el profesor Rutherford que 'mientras el calor suministrado por todas las combinaciones químicas posibles resulta insuficiente para justificar el calor del Sol y la Tierra, el reciente descubrimiento de que los cuerpos radiactivos son capaces de emitir una cantidad de calor del orden de un millón de veces mayor del que se desarrolla en la reacción química más violenta, ha arrojado una luz completamente nueva sobre la cuestión'. El cálculo de la edad de la Tierra debido a Lord Kelvin, que suponía que la Tierra era un simple cuerpo en proceso de enfriamiento donde ya no se generaba más calor, resulta así inválido, pues el gradiente de temperaturas actual puede que haya sido el mismo durante un gran intervalo de tiempo.»

Un retraso de elefante. «Hace pocas semanas, mientras un tren de circo salía de Spokane (Washington), la máquina, de repente, 'se paró'. Encontraron el depósito de agua completamente vacío; sin embargo, poco antes se había llenado en la toma de agua de la estación. No se halló explicación alguna a tan desconcertante situación hasta que no se vio agua manando del vagón del elefante contiguo al ténder. Parece que 'Jumbo' había estado divirtiéndose extendiendo la trompa a través de la ventanilla de su vagón hasta el depósito del ténder para sorber agua, con la que regaba a los demás animales del vagón. Parecían 'pollos mojados'; e innecesario resulta decir que el baño involuntario les había gustado tanto como al maquinista el retraso.»

...ciento cincuenta años

La edad de la Tierra y la fe. «Reviste suma importancia en nuestro tiempo la discusión acerca de la edad de nuestro planeta y los cambios habidos en él tal como los narra el Génesis. Unos creen que los sucesivos actos de creación mencionados en el Génesis tuvieron lugar en el orden exacto allí descrito, pero sin que los días que se citan correspondieran a días solares, sino a *períodos de tiempo indefinidos* —algunos de larga duración— acaso de sesenta mil años. Entre los que defienden esta tesis se cuentan la mayoría de los sabios geólogos y teólogos. En la opinión de Sir Charles Lyell, la formación del delta del Mississippi debió durar 67.000 años.»

Limpiadora de ventanas. «La figura adjunta muestra una visión en perspectiva de un método y un aparato para limpiar ventanas. El ingenio, patentado, permite a cualquier persona limpiar ventanas arrojando sobre ellas un chorro de agua desde la boquilla de un caño y sin emplear para ello otros utensilios que un balde, una vara y un tubo.»



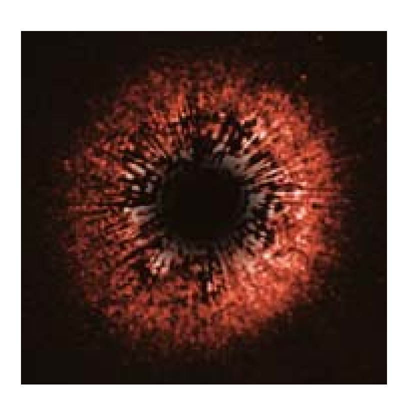
Ventanas más limpias merced al ingenio, 1855

APUNTES

ASTRONOMIA

Los orígenes de un sistema planetario

El telescopio espacial Hubble ha fotografiado el disco de residuos que rodea a la estrella amarilla enana HD 107146. Su presencia es indicio de la existencia de planetesimales, cuerpos en órbita alrededor de la estrella que pueden acabar componiendo planetas. Sin choques de planetesimales, no se repondría el polvo del disco, y acabaría desapareciendo. Aunque las características de esa estrella se asemejan a las del Sol, sólo tiene entre 30 y 250 millones de años. El Hubble, pues, nos ha mostrado un disco como el que rodeó al Sol en sus principios y del que nació el sistema solar. Parece, eso sí, que HD 107146 acabará por tener un sistema solar muy distinto del nuestro. La distribución de masa en el disco adopta una forma de anillo, pero de radio y anchura mucho mayores que el cinturón de Kuiper, la región llena de cometas y objetos pseudoplanetarios o planetarios que se extiende más allá de Neptuno. No parece probable que el disco vaya a evolucionar hasta configurarse como el cinturón de Kuiper. Este no llegó a su morfología actual mediante una compresión, sino que, según se piensa, fue expulsado hacia fuera por interacciones con Neptuno.



Este anillo de residuos (*en color falso*) rodea a la estrella joven HD 107146, a 88 años luz de la Tierra.

NASA, ESA, C. BEICHMAN (JPL), D. ARDILA (JHU) Y J. KRIST (STScI/JPL)

FISICA

La canción de las dunas

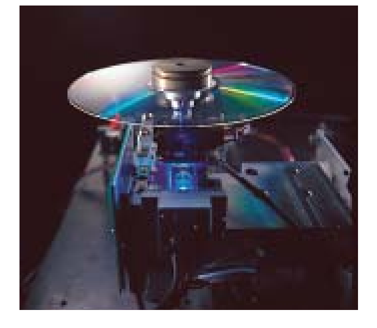


En diciembre de 1997 publicábamos un artículo, "Los sonidos de la arena", sobre el impresionante retumbo que se oye en diferentes desiertos del mundo cuando la arena de las dunas se desploma por su cara más inclinada. El artículo terminaba diciendo que ese sordo y potente zumbido seguía siendo "un rompecabezas sin resolver". Marco Polo contaba que "espíritus malignos" llamaban por su nombre a los que se rezagaban tras una caravana y se quedaban solos en el desierto, hasta perderlos del todo, y hacían oír instrumentos musicales, tambores y choque de armas. Ahora, el físico Bruno Andreotti ha presentado una explicación moderna de esta "canción de las dunas", como titula su artículo, tras efectuar estudios de campo en las dunas barjanas, o en media luna, de Marruecos. La avalancha produciría en la superficie de la duna unas ondas elásticas que generarían la emisión acústica del aire. La frecuencia del correspondiente sonido, alrededor de 100 hertz, dependería del ritmo medio con que chocan los granos de arena: entre las ondas elásticas y los granos habría una realimentación que sincronizaría las colisiones. Ese acoplamiento sería la clave del estruendo de las dunas.

ALMACENAMIENTO DE DATOS

Cien películas en la palma de la mano

Los nuevos DVD de láser azul van a multiplicar, según el formato, por cinco o sólo por tres —aunque con mejor compresión— el número de bytes de información que se pueden guardar en una capa de un disco. Con cuatro capas, podrán almacenar unas pocas horas de cine y televisión de alta definición, aunque la verdad es que su capacidad sólo será la justa para ese estándar de vídeo; no les quedará margen para posteriores avances. El equipo de Peter Török, del Colegio Imperial de Londres, con la participación de la Universidad de Tesalónica, ha encontrado una forma de ampliar mucho más las posibilidades de los discos. Ahora, las ristras de ceros y unos de la información digitalizada se inscriben en la superficie del disco marcando pozos en ella. La nueva idea consiste en inscribir más de un bit por pozo. Para ello, se les da una forma asimétrica. La información se recupera mediante la lectura de los distintos ángulos de reflexión del láser lector, también azul. Cada capa podría almacenar 250 gigabytes por cara. Török cree que esta técnica, el "almacenamiento óptico de dato con multiplexión" (MODS), hoy realizada sólo de forma experimental con unos cuantos pozos, podría llegar al mercado entre 2010 y 2015. Quizá sea demasiado tarde, porque puede que entonces tenga que competir con el almacenamiento mediante hologramas tridimensionales, escritos y leídos también con láseres azules, método mucho más



Aún no están a la venta los DVD de láser azul y ya hay nuevos métodos de almacenamiento óptico de datos que superarán, y mucho, su capacidad.

PIONEER CORPORATION

cercano a la comercialización. La empresa estadounidense InPhase —cuya hoja Web se abre con el lema "imagínese que tiene cien películas en la palma de la mano"— anunciaba en enero el primer prototipo de una unidad holográfica de memoria, Tapestry (tapiz), que llegará al mercado a finales de 2006; en 2009 debería ya almacenar 1,6 terabytes (1600 gigabytes). Una casa japonesa, Optware, anunciaba, a la vez que InPhase, la salida al mercado para junio 2006 del HVD, el disco versátil holográfico, de 200 gigabytes de capacidad, para empresas, al que seguirá un disco de 100 gigabytes para uso doméstico; también venderá unidades con el tamaño de una tarjeta de crédito, las tarjetas versátiles holográficas (HVC), de 30 gigas.

ETICA Y MEDICINA

La defensa de la propia condición

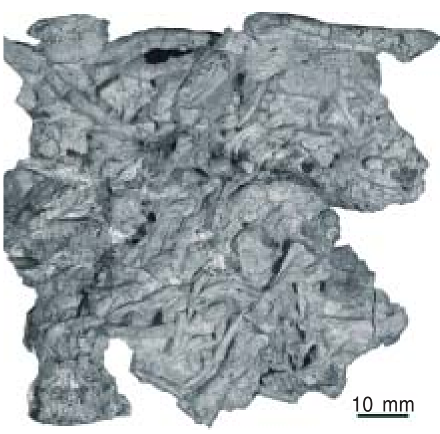
Hay conformaciones humanas congénitas que se suelen tomar por enfermedades, estados deficientes que deben modificarse para acercarlos a la constitución mayoritaria. Sin embargo, las personas así conformadas no siempre aceptan esa manera de entender su situación. La reivindicación de la propia naturaleza ha ido dando lugar incluso a movimientos organizados. El aspecto más polémico es su reticencia a que se apliquen terapias correctoras durante la infancia. Ponen en entredicho que resulten tan deseables como los demás piensan. Es el caso del enanismo y la administración de la hormona del crecimiento. De estas reivindicaciones de la propia condición, quizá ninguna adquiera un carácter tan dramático y combativo como la del autismo por autistas. Quienes se han empeñado en ese propósito prefieren llamarse así, autistas, y no "personas con autismo", expresión supuestamente correcta donde, sin embargo, ven un implícito desprecio a lo que son. Michelle Dawson ha testimoniado ante el Tribunal Supremo de Canadá contra el "análisis aplicado del comportamiento", un tratamiento del autismo, cuando algunas familias pretendieron que el gobierno lo costease. Ha recibido réplicas violentas, entre ellas la de la madre de una "persona con autismo", que acusa a Dawson de ser "dañina y peligrosa para los niños". "El autismo", escriben quienes realizan autistics.org, "aun con las dificultades que tiene asociadas, es inseparable de lo que somos". Sienten que se rechaza su mismidad. "¿Qué es lo peor de ser autista?", cuenta Dawson que le preguntaron de niña. "Que nos odian."

PALEONTOLOGIA

Repenomamus

En el año 2000 se descubrió en China una especie de mamífero del Mesozoico, *Repenomamus robustus,* que contradecía la tesis admitida según la cual los mamíferos de la era de los dinosaurios tenían un tamaño muy pequeño. Ahora, el mismo equipo ha hallado otra especie fósil aún mayor de ese género, a la que ha dado el nombre de *Repenomamus giganticus,* e indicios de que *R. robustus* ingería crías de dinosaurio, anuncio éste último que ha tenido mucha repercusión en la prensa mundial. Las proporciones de la nueva especie recuerdan a las de un diablo de Tasmania grande (un marsupial). La dentadura, con todas las piezas de las mandíbulas desarrolladas y algo desgastadas, corresponde a un adulto, aunque joven: acababa de salirle el último molar inferior, libre todavía de desgaste. Los fuertes y puntiagudos dientes anteriores de ambas especies, y su poderosa musculatura maxilar, indican que fueron carnívoros. Ratifica esta impresión el hallazgo que más ha llamado la atención: en un fósil de *R. robustus* con los huesos enteros, los huesos rotos y desplazados de un juvenil de *Psittacosaurus*, dinosaurio herbívoro, concentrados en la parte del cuerpo que debió de corresponder en el *robustus* al estómago. Parece que esa cría reptil medía unos 140 mm, la tercera parte que el mamífero. Ya tenía dientes, algunos desgastados, luego no era un feto. Aunque este hallazgo se ha solido presentar como prueba de que los *repenomamus* eran predadores de dinosaurios, sólo un argumento bastante indirecto inclina a pensar que lo fueran. Como los autores de estos descubrimientos comentan en *Nature*, no abundan los carroñeros entre los mamíferos aún existentes: sólo se sabe que lo sean dos especies de hienas, que tienen una potencia muscular mandibular y segundos incisivos superiores menores que en las hienas cazadoras. Los *repenomamus* no exhiben esas mermas, que quizá incapaciten para la caza.





Hace más de 130 millones de años había ya mamíferos de un tamaño considerable; es el caso de *Repenomamus giganticus,* descubierto en China. Debió de ser carnívoro: en el espacio que ocupó el estómago de otro mamífero del mismo género, *R. robustus*, se han encontrado huesos rotos de una cría de dinosaurio.

YAOMING HU, JIN MENG, YUANQING WANG Y CHUANKUI LI EN *NATURE*, VOL. 433, N.º 7022; 13 DE ENERO DE 2005



Endocannabinoides cerebrales

La investigación sobre sustancias naturales que remedan los efectos de la marihuana en el cerebro podría arrojar luz sobre el tratamiento del dolor, la ansiedad, los desórdenes alimentarios, las fobias y otros trastornos

Roger A. Nicoll y Bradley E. Alger

Cuenta la marihuana con una historia de luces y de sombras. Su nombre evoca, en algunos, imágenes de embriagados estupefactos, perdidos por el espacio exterior. Para otros es sinónimo de serenidad, de ralentización de la ajetreada vida moderna. A los enfermos de cáncer, les ayuda a soportar las debilitantes náuseas que provoca la quimioterapia; alivia también el dolor crónico. La marihuana es todo eso y mucho más; su historia milenaria se extiende en el tiempo y la geografía de varios continentes. En realidad, todos estamos familiarizados con esta sustancia. Cualesquiera que sean nuestra orientación política o aficiones recreativas, cada uno de nosotros, sin excepción, "cultiva" en su cerebro una variedad de esta droga: los endocannabinoides (de *Cannabis sativa*, el nombre científico de la marihuana).

La investigación reciente en torno a estos compuestos naturales ha conducido a descubrimientos muy sugestivos. Se ha puesto de manifiesto un nuevo sistema de transmisión de señales en el cerebro, una forma de comunicación interneuronal que hace quince años ni tan siquiera se presentía. El pleno conocimiento de este sistema de señalización podría cosechar enormes beneficios, pues arrojaría luz sobre el tratamiento de la ansiedad, el dolor, las náuseas, la obesidad, las lesiones cerebrales y otros trastornos. Tales tratamientos se diseñarían de suerte tal que evitarían los efectos secundarios de la propia marihuana.

Un pasado cuajado de altibajos

La marihuana, con sus equivalentes bhang, hachís y otros, se cuenta entre las drogas psicoactivas más consumidas en todo el mundo. Sin embargo, cada cultura ha utilizado esta planta de forma distinta. En la China antigua se conocían sus propiedades analgésicas y su capacidad de alterar el estado mental, si bien no se la utilizó mucho con esos fines, sino que se cultivó con fines textiles: cáñamo para la fabricación de cuerdas y tejidos. Griegos y romanos de la antigüedad clásica se valieron también del cáñamo para trenzar cuerdas y tejer velas. En otros lugares, en cambio, la maría destacó por sus efectos embriagadores. En la India, por ejemplo, se incorporó a los rituales religiosos. Fue de uso habitual en los territorios árabes durante la Edad Media. En el siglo XV se utilizó en Irak para tratar la epilepsia. En Egipto se consumía, principalmente, por sus propiedades embriagadoras; este uso llegó a Euro-

pa tras la invasión de Egipto por Napoleón. En los tiempos del comercio de esclavos, se transportó de Africa a México, al Caribe y a Sudamérica.

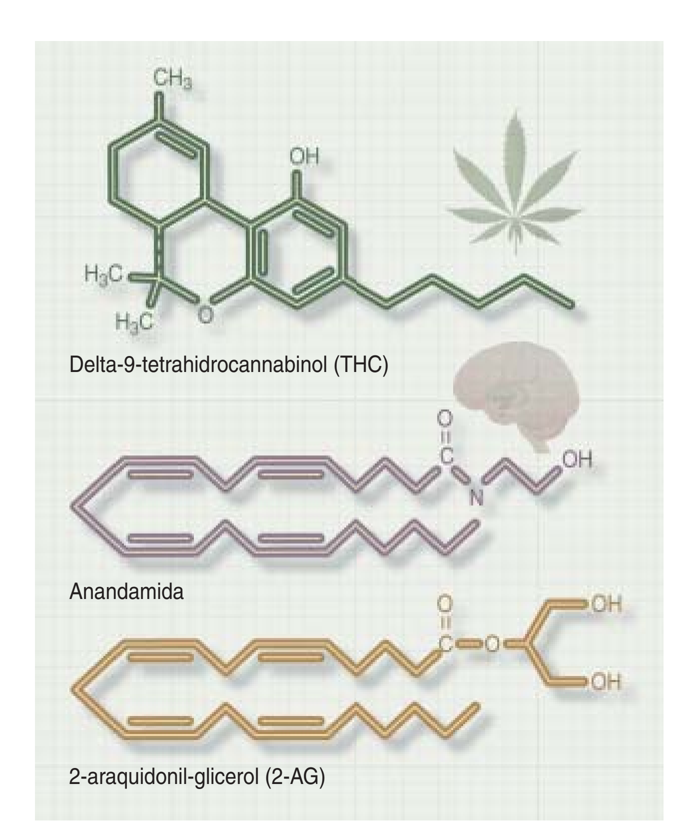
En los EE.UU., la marihuana logró adeptos hace relativamente poco. Durante la segunda mitad del siglo XIX y en los albores del XX, se podía disponer libremente, sin receta, de *cannabis*; se utilizaba para una amplia gama de afecciones, desde la migraña a las úlceras. Los inmigrantes venidos de México introdujeron el uso "recreativo" en Nueva Orleáns y en otras grandes ciudades, donde ganó popularidad entre los músicos de jazz. Hacia los años treinta del siglo pasado había caído en descrédito; una intensa campaña presionó para demonizar la "locura del porro". En 1937, el Congreso estadounidense, en contra de las recomendaciones de la Asociación Médica Americana, aprobó un gravamen de la marihuana ("Marijuana Tax Act"), que, de hecho, al encarecerla y dificultar su acceso, suponía la prohibición de la droga. Desde entonces, la marihuana se convirtió en una de las sustancias más controvertidas en la sociedad estadounidense. A pesar de los esfuerzos por modificar su estatuto legal, continúa recibiendo la clasificación federal de droga de "Clase 1", lo mismo que la heroína y el ácido lisérgico (LSD), es decir: peligrosa y sin utilidad.

Millones de personas fuman o ingieren marihuana por sus efectos embriagadores, a menudo comparados con la euforia que provoca el alcohol. Se estima que alrededor del 30 por ciento de la población estadounidense mayor de 12 años ha probado la marihuana aunque sólo el 5 por ciento son consumidores habituales. En dosis elevadas, produce alucinaciones en ciertos sujetos, mientras que a otros simplemente les provoca somnolencia. Merma la memoria de corto plazo y las capacidades cognitivas; también tiene efectos adversos sobre la coordinación motora. Sin embargo, parece que tales daños son reversibles: el organismo se recupera una vez eliminada la sustancia. El hábito de fumar marihuana conlleva asimismo peligros para la salud similares a los del tabaquismo.

Con todo, esta droga ofrece también claros efectos medicinales: alivia el dolor y la ansiedad, evita la muerte de neuronas lesionadas, acaba con los vómitos y estimula el apetito —propiedades de gran utilidad para los enfermos que sufren los efectos secundarios de la quimioterapia.

Resumen/Marihuana endógena

- La marihuana y otras drogas afines afectan a la conducta porque actúan sobre los receptores que el cerebro destina a sus propios cannabinoides.
- Estos cannabinoides endógenos intervienen en la regulación del dolor, la ansiedad, el hambre y el vómito, entre otros procesos. Ello explica la diversidad de efectos de la marihuana.
- Quizá se logre desarrollar tratamientos para varios trastornos mediante fármacos que remeden algunas de las acciones beneficiosas de los cannabinoides, aunque exentos de los efectos secundarios de la marihuana.



TOMMY MOORMAN

1. A PESAR DE LAS DIFERENCIAS estructurales, el THC (que se produce en la planta de la marihuana) y la anandamida y el 2-AG (ambos sintetizados en el cerebro) activan el mismo receptor cerebral (CB1).

El principio activo

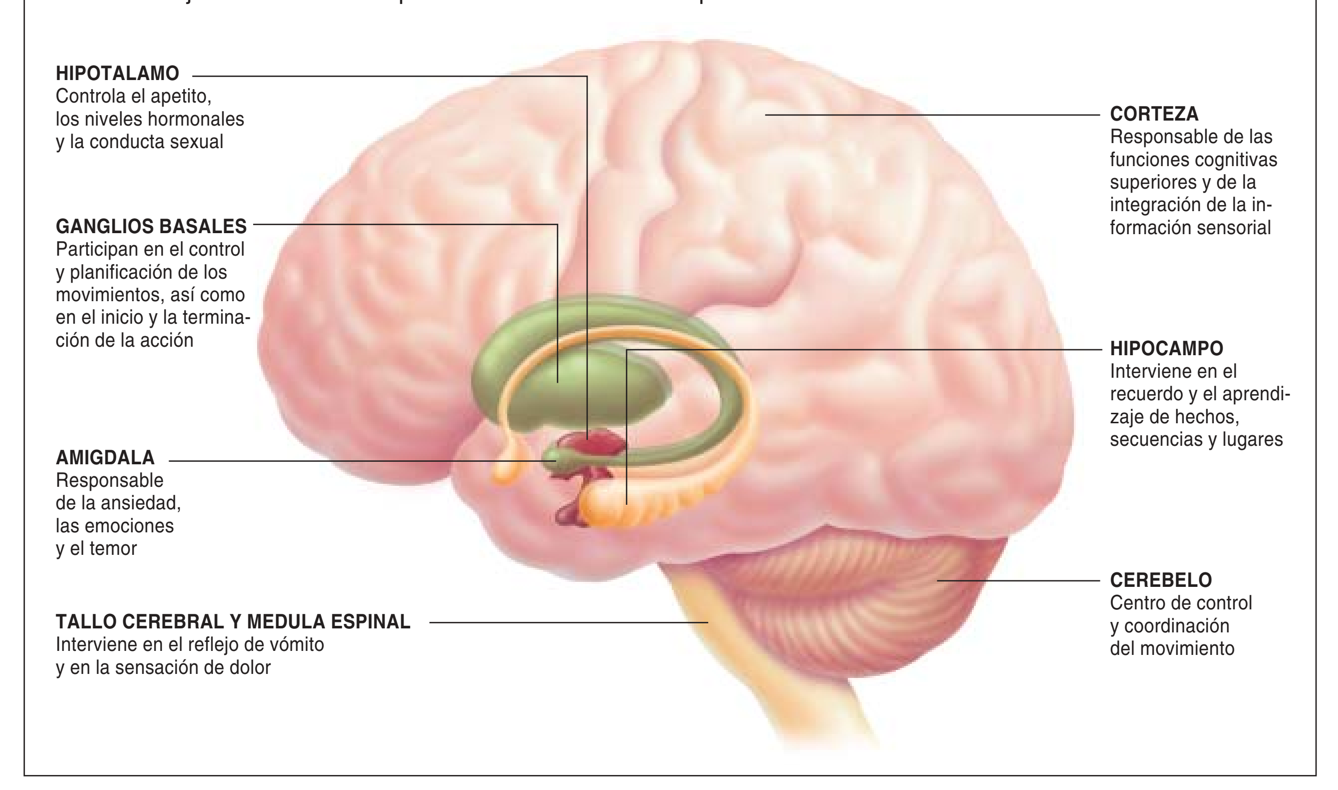
El camino que ha llevado a desvelar los mecanismos por los que esta droga ejerce tal miríada de efectos ha sido largo. Tras casi un siglo de trabajos de numerosos expertos, Raphael Mechoulam, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, identificó en 1964 el compuesto responsable de casi toda la actividad farmacológica de la marihuana: el delta-9-tetrahidrocannabinol, o THC. El paso siguiente había de consistir en identificar el receptor, o receptores, a los que el THC se unía.

Los receptores son pequeñas proteínas que se encuentran incrustadas en la membrana de todas las células, neuronas incluidas. Cuando se unen a ellos moléculas específicas —encajando como las piezas de un rompecabezas— se producen cambios en la célula. Algunos receptores cuentan con poros o canales llenos de agua que permiten la entrada o salida de iones; operan modificando la diferencia de potencial eléctrico entre el interior y el exterior de la célula. Existe otra numerosa familia de receptores (sin canales) que se acoplan a unas proteínas especializadas, las proteínas G; su activación pone en marcha varias cascadas de señalización bioquímica en el seno de la célula que producen, a menudo, cambios en los canales de iones.

En 1988, Allyn C. Howlett y sus compañeros de la Universidad de San Luis añadieron un marcador radiactivo a un derivado químico del THC. Observaron a dónde iba a parar esta sustancia en el cerebro de la

CENTROS DE ACTUACION DE LA MARIHUANA

La droga *Cannabis sativa* se une a los receptores que el cerebro destina a los cannabinoides endógenos. Esta “suplantación” ocurre en varias zonas, entre ellas las resaltadas en la ilustración. Semejante ubicuidad explica la diversidad de efectos asociados a la marihuana y a sus equivalentes endógenos. Al propio tiempo, sugiere tratamientos farmacológicos dirigidos a dianas específicas para controlar, por ejemplo, el apetito o el dolor.



ALICE CHEN

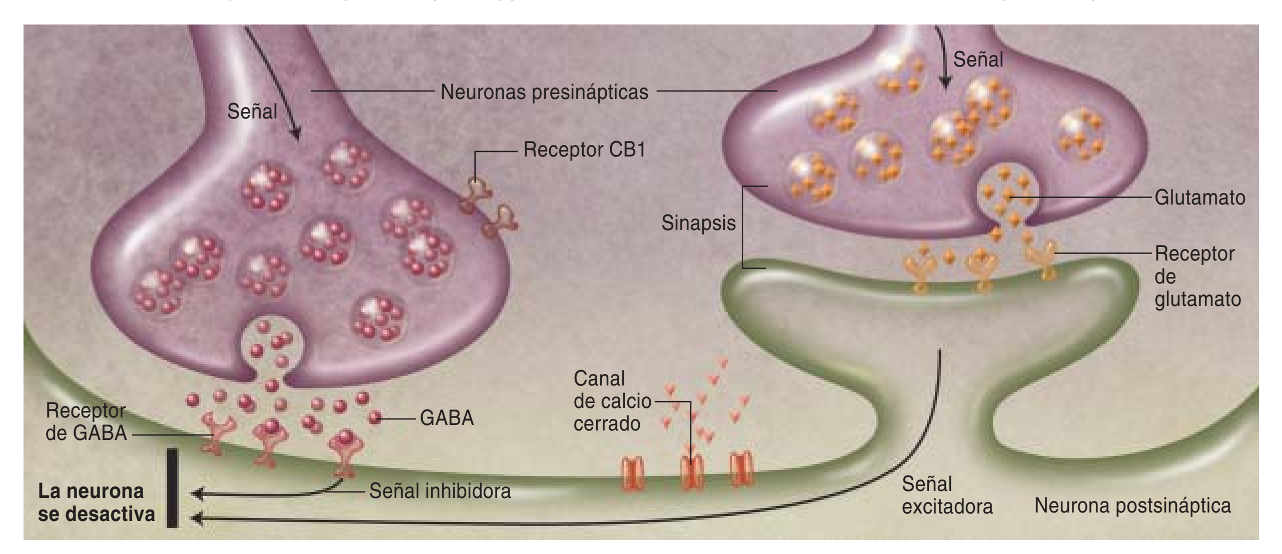
rata. Descubrieron que se unía, por sí mismo, al que se denominó receptor cannabinoide o CB1. Basándose en este trabajo y en el de Miles Herkenham, del norteamericano Instituto Nacional de la Salud (NIH), Lisa Matsuda, también del NIH, logró clonar el receptor CB1. La importancia del CB1 en la acción del THC quedó demostrada cuando Catherine Ledent, de la Universidad Libre de Bruselas, y Andreas Zimmer, del Laboratorio de Neurobiología Molecular de la Universidad de Bonn (dos investigadores que trabajaban de forma independiente), consiguieron criar ratones que carecían de este receptor. Ambos constataron que la administración de THC prácticamente no producía efectos en aquellos múridos: el compuesto no tenía dónde “amarrarse” y, por tanto, no desencadenaba actividad alguna. (Más tarde, se descubrió un segundo receptor cannabinoide, el CB2; opera sólo en el exterior del cerebro y de la médula espinal y participa en el sistema inmunitario.)

El estudio del CB1 prosiguió. Se descubrió que se trata de uno de los receptores acoplados a proteínas G más abundantes en el cerebro. Presenta densidades máximas en la corteza, hipocampo, cerebelo, ganglios basales, tallo cerebral, médula espinal y amígdala. Semejante ubicuidad explica la diversidad de efectos de la marihuana. El poder psicoactivo de esta droga procede de su acción en la corteza cerebral. Las alteraciones mnémicas hunden su raíz en el hipocampo, una estructura esencial para la elaboración de recuerdos. Las disfunciones motoras derivan de la acción de la droga sobre los centros cerebrales de control del movimiento. La acción analgésica se localiza en el tallo cerebral y la médula espinal; el tallo cerebral, por otra parte, controla también el reflejo del vómito. El hipotálamo interviene en el apetito; la amígdala, en las respuestas emocionales. Así pues, si la marihuana resulta polifacética es porque actúa en todas partes.

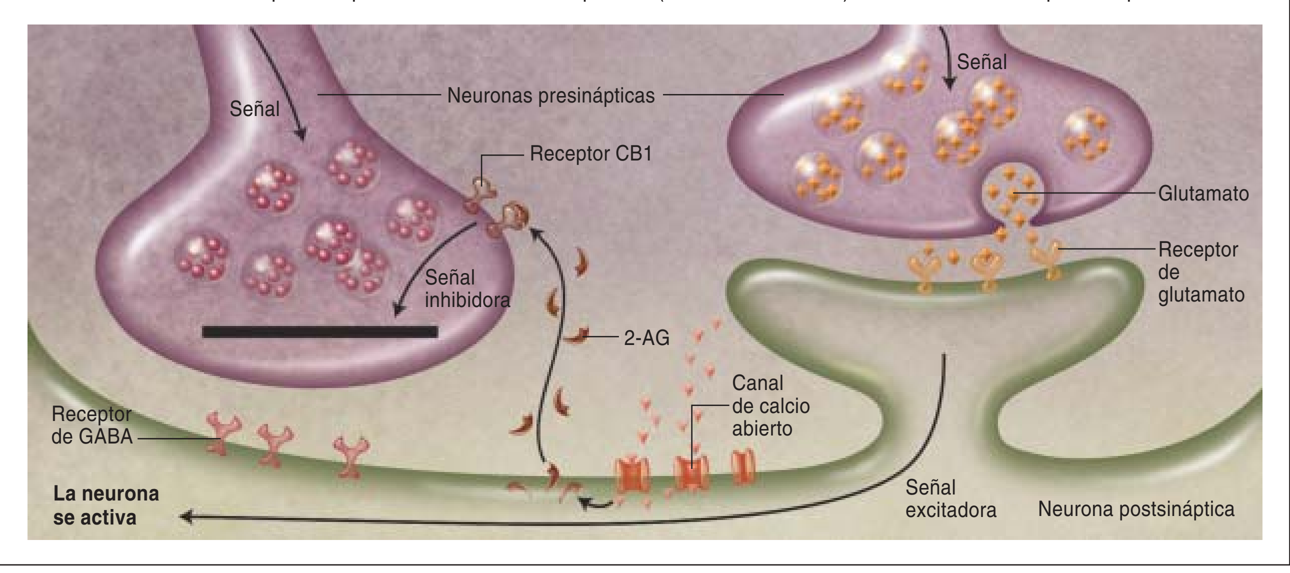
Andando el tiempo, se ahondó también en la localización neuronal del CB1. Estudios realizados por Tamás F. Freund, del Instituto de Medicina Experimental de la Academia Húngara de Ciencias de Budapest, y Kenneth P. Mackie, de la Universidad de Washington, revelaron que el receptor cannabinoide se presentaba sólo en ciertas neuronas y en posiciones sumamente específicas de dichas neuronas. Se hallaba densamente empaquetado sobre neuronas que liberaban GABA (ácido gamma-aminobutírico), el principal neurotransmisor inhibidor (“ordena” a las neuronas receptoras que detengan la emisión de señales). El CB1 se asentaba también cerca de la sinapsis, la zona de contacto entre dos neuronas. A tenor de esa ubicación, podía pensarse que el receptor cannabinoide participaba de

SEÑALIZACION RETROGRADA

Se ha descubierto que los cannabinoides endógenos (endocannabinoides) participan en la señalización retrógrada, una forma de comunicación cerebral anteriormente desconocida. En lugar de fluir en el sentido habitual, desde la neurona presináptica (que emite neurotransmisores) hacia la postsináptica (que los recibe), los endocannabinoides operan en sentido inverso, de la célula postsináptica a la presináptica. El endocannabinoide 2-AG liberado por una célula postsináptica, por ejemplo, provoca en la presináptica una reducción de la secreción del neurotransmisor inhibidor GABA hacia la célula postsináptica.



Si el GABA de una neurona presináptica alcanza una célula postsináptica al propio tiempo que las señales excitadoras (como las que encierra el neurotransmisor glutamato) (*arriba*), el GABA bloquea la activación de la célula postsináptica. No obstante, si los cambios en la concentración de calcio de la neurona postsináptica desencadenan la producción del endocannabinoide 2-AG (*abajo*), esta molécula viaja en sentido inverso hacia su receptor (CB1) en la neurona productora de GABA. La supresión de inhibición inducida por despolarización (DSI) impide entonces la liberación de GABA, permitiendo así que las señales excitadoras (neurotransmisores) alcancen la célula postsináptica.



ALICE CHEN

algún modo en la transmisión de señales a través de las sinapsis que utilizan GABA. Sin embargo, ¿por qué el sistema de comunicaciones cerebral habría de contar con un receptor para una sustancia producida por una planta?

La lección del opio

Esta misma cuestión se había planteado en los años setenta con relación a la morfina, un compuesto que se extrae de la adormidera y del que se descubrió que se unía a los receptores opiáceos del cerebro. Se halló que los humanos fabricamos nuestros propios opioides: las encefalinas y las endorfinas. Lo único que hace la morfina es secuestrar para sí los receptores destinados a los opioides cerebrales.

Parecía verosímil que algo parecido estuviera ocurriendo con el THC y el receptor cannabinoide. En 1992, 28 años después de haber identificado el THC,

Mechoulam descubrió un pequeño ácido graso, producido en el cerebro, que se unía al CB1 y remedaba todos los efectos de la marihuana. Lo denominó "anandamida", por "ananda", palabra sánscrita que significa "éxtasis". Posteriormente, Daniele Piomelli y Nephi Stella, de la Universidad de California en Irving, descubrieron que otro lípido, el 2-araquidonil-glicerol (2-AG), abundaba en ciertas regiones del cerebro más que la propia anandamida. Estos dos compuestos se consideran hoy los principales cannabinoides endógenos o endocannabinoides. (En fecha reciente se han identificado otros compuestos que parecen cannabinoides endógenos, pero aún no se conoce con certeza el papel que desempeñan.) Los dos receptores cannabinoides evolucionaron claramente a la par que los endocannabinoides, tomando parte en los sistemas de comunicación intercelular. Si la marihuana logra activar los receptores cannabinoides es porque se asemeja lo suficiente a los compuestos endocannabinoides.

Los neurotransmisores comunes son hidrosolubles; a la espera de ser liberados por una neurona, se almacenan, a concentraciones elevadas, en vesículas. Cuando una neurona se activa, envía una señal eléctrica que se transmite a lo largo del axón hasta llegar a sus extremos (las terminales presinápticas); allí, las vesículas liberan los neurotransmisores, que cruzan un diminuto espacio intercelular (la hendidura sináptica) hasta alcanzar los receptores de la superficie de la neurona receptora o postsináptica. Los endocannabinoides, en cambio, son lípidos; no se hallan almacenados sino que se sintetizan con prontitud a partir de componentes de la membrana celular. Acto seguido, se liberan desde lugares repartidos por toda la célula cuando aumenta la concentración intracelular de calcio o se activan ciertos receptores acoplados a proteínas G.

Esta singular actividad neurotransmisora cubría los cannabinoides de misterio; durante varios años, nadie consiguió averiguar cuál era su función en el cerebro. La respuesta se presentó de forma inesperada en el comienzo de los noventa. Varios expertos, entre ellos uno de los autores (Alger) y Thomas A. Pitler descubrieron algo insólito al estudiar las neuronas piramidales, las principales células del hipocampo: tras elevar la concentración intracelular de calcio durante un breve tiempo, las señales inhibidoras que llegaban desde otras neuronas en forma de GABA disminuyeron.

Al propio tiempo, el grupo de Alain Marty observaron esa misma respuesta en células nerviosas tomadas del cerebelo. Nadie esperaba semejante hallazgo. Por lo que se sabía, en los cerebros maduros las señales fluían, unidireccionales, a través de las sinapsis: desde la célula presináptica hacia la postsináptica. Aquellos resultados, en cambio, sugerían que las células receptoras afectaban a las células emisoras.

Señalización retrógrada

Estimulados por la posibilidad de haber descubierto una nueva forma de comunicación neuronal, los investigadores se dispusieron a ahondar en el fenómeno. A esa actividad la denominaron "supresión de inhibición inducida por despolarización" (DSI). Para que tuviera lugar, debía existir algún mensajero que viajara desde la célula postsináptica hasta la presináptica liberadora de GABA y suspendiera la liberación del neurotransmisor.

Que se supiera, este tipo de señales "hacia atrás" solamente acontecían durante el desarrollo del sistema nervioso. Si resultaba que también participaban en la comunicación entre neuronas adultas, se abría la posibilidad de que operaran en el cerebro otros procesos basados en una transmisión retrógrada. Quizás estas señales se encargarían de tareas difíciles o imposibles de lograr mediante la transmisión sináptica conocida. Por todo ello, revestía la mayor importancia conocer las propiedades de la señal retrógrada. Su identidad, empero, eludió todos los esfuerzos. Se llegaron a proponer un sinfín de moléculas, pero ninguna de ellas operó como se había predicho.

Hasta que, en 2001, uno de los autores (Nicoll) y Rachel I. Wilson, de la Universidad de California en San Francisco —y al mismo tiempo, pero de forma independiente, un grupo dirigido por Masanobu Kano, de la Universidad Kanazawa—, hicieron saber que un endocannabinoide, probablemente el 2-AG, cumplía a la perfección los requisitos del mensajero misterioso. Ambos grupos descubrieron que un compuesto que bloquee los receptores cannabinoides de las células presinápticas impide la DSI y que, de forma recíproca, compuestos que activan el CB1 favorecen la DSI. No tardaron en demostrar que los ratones carentes de receptores cannabinoides son incapaces de generar la DSI. La ubicación de los receptores en las terminales presinápticas de las neuronas GABA resultaba ahora perfectamente lógica: estaban prestos a detectar y responder a los endocannabinoides liberados desde las células postsinápticas aledañas.

Ahora sabemos que la DSI constituye un proceso relevante para la actividad cerebral. La amortiguación temporal de la inhibición refuerza una forma de aprendizaje denominada potenciación a largo plazo, que almacena la información mediante el reforzamiento de sinapsis. Tal almacenaje y transferencia de información a menudo involucra pequeños conjuntos de neuronas, en lugar de grandes poblaciones; los endocannabinoides resultan idóneos para actuar sobre estas pequeñas agrupaciones neuronales. Al tratarse de moléculas liposolubles, no se difunden a grandes distancias en el medio extracelular del cerebro, que es acuoso. Voraces mecanismos de absorción y degradación contribuyen a garantizar que estas moléculas operen en un espacio reducido y un tiempo limitado. Así pues, la DSI, un efecto local efímero, permite a las neuronas desconectarse brevemente de sus vecinas y codificar información.

Una pléyade de nuevos hallazgos han ido resolviendo las cuestiones que dificultaban la comprensión de la función celular de los endocannabinoides. Se ha demostrado que cuando estos neurotransmisores se encajan en el CB1, en ocasiones bloquean la liberación de neurotransmisores excitadores en las células presinápticas. Lo mismo que Wade G. Regehr, de Harvard, y Anatol C. Kreitzer, hoy en Stanford, encontraron en el cerebelo, los endocannabinoides de las terminaciones nerviosas excitadoras contribuyen a la regulación



PACIENTE DE CANCER que fuma marihuana para aliviarse de las náuseas que le provoca la quimioterapia. Los fármacos que refuerzan o bloquean selectivamente determinados efectos de los cannabinoides endógenos deberían contribuir a tratar diversas afecciones, entres ellas las mencionadas en el recuadro.

En el tratamiento contra:

Ansiedad. Se cree que es la deficiencia en el número de receptores cannabinoides o en la liberación de cannabinoides endógenos la alteración que subyace bajo el síndrome de estrés postraumático y bajo la ansiedad crónica. Con el fin de aliviar la ansiedad, se investiga cómo evitar la degradación de la anandamida; ello aumentaría la cantidad disponible de este cannabinoide endógeno para actuar sobre los receptores correspondientes.

Apetito y obesidad. Se ha demostrado que el dronabinal, un medicamento cannabinoide contra las náuseas, estimula el apetito en pacientes tratados con inmunosupresores. Ello sugiere la posibilidad de reducir el apetito mediante un antagonista, un compuesto que bloquee los receptores cannabinoides. Los ensayos clínicos de uno de estos antagonistas han ofrecido resultados alentadores, aunque se han detectado numerosos efectos secundarios.

Náuseas. Existen en el mercado diversos fármacos —dronabinal y nabilone entre otros— similares al THC (el componente activo de la marihuana), que por ello reducen las náuseas asociadas a la quimioterapia.

Enfermedades neurológicas. La dopamina, un neurotransmisor que desempeña un importante papel en el placer y la motricidad, provoca la liberación de endocannabinoides. Mediante la regulación de la actividad de los endocannabinoides se pretende tratar la enfermedad de Parkinson, la adicción a las drogas y otros trastornos en los que interviene el sistema de la dopamina.

Dolor. Un gran número de receptores cannabinoides se han observado en varios centros cerebrales del dolor. Ello sugiere la posibilidad de aliviar el dolor con medicamentos que actúen sobre tales receptores.

JEFF ALBERTSON *Corbis*

de las incontables sinapsis que intervienen en el control de los movimientos coordinados y en la integración sensorial. Dicha participación explica, en parte, la ligera disfunción motora y la alteración de la percepción sensorial que se suelen asociar al consumo de marihuana.

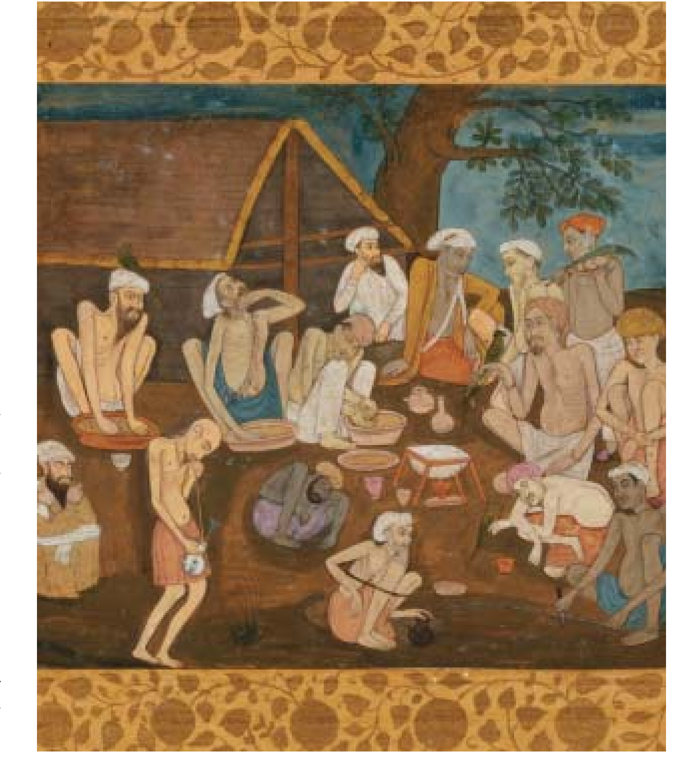
Merced a recientes resultados, se ha empezado a describir con precisión la relación que existe entre los efectos neuronales de los endocannabinoides y los efectos fisiológicos y conductuales. Para investigar las bases de la ansiedad suele empezarse por entrenar a roedores para que asocien una señal con algo que los asusta. Por ejemplo, se combina un determinado sonido con una breve descarga eléctrica en las patas. Con ello se consigue que, al cabo de poco tiempo, el animal se estremezca (mostrando rigidez) con sólo oír el sonido, previniendo la descarga. Sin embargo, si el sonido se repite varias veces sin acompañarse de la descarga, el animal deja de mostrar temor ante el sonido. Mediante un proceso de "extinción", desaprende el condicionamiento de miedo. En 2003, el grupo dirigido por Giovanni Marsicano, demostró que los ratones carentes de CB1 normal aprendían presto a temer el sonido asociado a la descarga, pero, a diferencia de los animales con CB1 intacto, no lograban perder ese miedo cuando el sonido dejaba de acompañarse de la descarga.

A tenor de estos resultados, los endocannabinoides intervienen en la extinción del dolor y de sentimientos adversos desencadenados por el recuerdo de experiencias pasadas. Quizá sea una deficiencia en el número de receptores cannabinoides o en la liberación de cannabinoides endógenos la alteración que subyace al síndrome de estrés postraumático, a las fobias y a ciertas formas de dolor crónico. Abona esta hipótesis el hecho de que hay quienes fuman marihuana para aliviar su ansiedad. De ser así, sucedáneos de estas sustancias naturales podrían ayudarnos a olvidar el pasado cuando las señales que hemos aprendido a asociar con ciertos peligros hayan dejado de tener sentido en el mundo real.

Aplicaciones terapéuticas

Aunque todavía no se ha desvelado por completo el repertorio de los endocannabinoides, el conocimiento adquirido sobre estos compuestos arroja luz sobre el desarrollo de tratamientos basados en las propiedades medicinales de la marihuana. Varios análogos sintéticos del THC se encuentran ya disponibles en el mercado; entre ellos la nabilona y el dronabinol. Ayudan a combatir las náuseas que provoca la quimioterapia; el dronabinol también estimula el apetito de los enfermos de sida. Otros cannabinoides alivian el dolor asociado a un gran número de enfermedades y trastornos. Además, un antagonista de CB1 —un compuesto que bloquea el receptor y lo incapacita— ha resultado eficaz en ensayos clínicos del tratamiento de la obesidad. Sin embargo, dado que carecen de especificidad, llegan a todas las regiones cerebrales, provo-

2. FAKIRES HINDUES aparecen preparando bhang y ganja en esta pintura de mediados del siglo XVIII. La marihuana cuenta con una historia milenaria. Antiguos textos chinos y egipcios describen su uso medicinal. En la segunda mitad del siglo XX, la identificación de su componente activo, el THC, condujo a un sorprendente descubrimiento, a saber, que nuestro cerebro fabrica su propia "marihuana".



STAPLETON COLLECTION *Corbis*

cando múltiples efectos secundarios: mareo, somnolencia y pérdida de concentración y de capacidad de razonamiento.

Una forma de eludir estos inconvenientes consiste en reforzar el papel de los cannabinoides endógenos. Si tal estrategia tuviera éxito, se podría recurrir a los endocannabinoides sólo cuando y donde fueran necesarios, evitando así los riesgos asociados a la activación indiscriminada de los receptores cannabinoides. Para ello, Piomelli y su grupo están desarrollando fármacos que impiden la degradación de la anandamida tras ser liberada por las células. Al no descomponerse de inmediato, sus efectos ansiolíticos tienen una mayor duración.

La anandamida parece ser el endocannabinoide más abundante en algunas regiones del cerebro, mientras que el 2-AG predomina en otras. Si se lograra una mayor comprensión del mecanismo de síntesis de cada endocannabinoide, quizá se podrían preparar fármacos que afectasen sólo a uno de los dos. Además, sabemos que los endocannabinoides no se producen cuando la neurona "dispara" una sola vez, sino cuando lo hace cinco o diez veces seguidas. Podrían diseñarse sustancias que modificasen el ritmo de disparo y, en consecuencia, la liberación de endocannabinoides. Hallamos un antecedente de esta propuesta en los agentes anticonvulsivos, que suprimen la hiperactividad neuronal responsable de los ataques epilépticos sin afectar a la actividad normal.

Por último, determinados métodos indirectos podrían incidir en los procesos que regulan la actividad de los endocannabinoides. Es bien sabido que la dopamina no es sólo el neurotransmisor cuya pérdida provoca la enfermedad de Parkinson, sino que desempeña, además, un papel clave en el sistema cerebral de recompensa. Numerosas drogas que causan placer o generan adicción, entre ellas la nicotina y la morfina, producen sus efectos en parte mediante la liberación de dopamina en diversos centros cerebrales. La dopamina provoca la liberación de endocannabinoides. Varios equipos de investigación han descubierto que otros dos neurotransmisores, el glutamato y la acetilcolina, inician también la síntesis y liberación de endocannabinoides. De hecho, es posible que los endocannabinoides sean responsables de efectos hasta ahora atribuidos a dichos neurotransmisores. Se podrían diseñar fármacos que, en lugar de apuntar directamente hacia el sistema endocannabinoide, afectasen a los neurotransmisores comunes. Cabría asimismo aprovechar las diferencias en la localización de los sistemas neurotransmisores para asegurar la liberación de endocannabinoides sólo allí donde se necesitaran y en la cuantía precisa.

Así pues, han sido los efectos de la marihuana los que han conducido a la investigación, todavía en curso, de los endocannabinoides. El receptor CB1 parece estar presente en todos los vertebrados; ello sugiere que los sistemas que utilizan la "marihuana cerebral" vienen existiendo desde hace, tal vez, 500 millones de años. En el transcurso de ese tiempo, los endocannabinoides se han adaptado para cumplir multitud de funciones, a menudo de gran sutileza. Hemos aprendido que no afectan al desarrollo de temor, sino a su olvido, que no modifican la capacidad de comer, sino el apetito, y así sucesivamente. Su presencia en regiones cerebrales asociadas con la conducta motora compleja, la cognición, el aprendizaje y la memoria implica que todavía queda mucho por descubrir sobre las funciones que la evolución ha ido otorgando a estos singulares mensajeros.

Los autores

Roger A. Nicoll y Bradley E. Alger empezaron a compartir su interés por la transmisión sináptica hace unos 25 años. Nicoll imparte clases de farmacología en la Universidad de California en San Francisco; reciente ganador del Premio Heinrich Wieland, es también miembro de la Academia Nacional de Ciencias. Alger es profesor de fisiología y psiquiatría en la facultad de medicina de la Universidad de Maryland.

Bibliografía complementaria

MARIJUANA AND MEDICINE. Compilación de J. E. Joy, S. J. Watson, Jr., y J. A. Benson, Jr. Institute of Medicine, 1999.

ENDOCANNABINOID SIGNALING IN THE BRAIN. R. J. Wilson y R. A. Nicoll en *Science*, vol. 296, págs. 678-682; 26 de abril de 2002.

RETROGRADE SIGNALING IN THE REGULATION OF SYNAPTIC TRANSMISSION: FOCUS ON ENDOCANNABINOIDS. B. E. Alger en *Progress in Neurobiology*; vol. 68, n.º 4, págs. 247-286; noviembre de 2002.



EL RETRATO DE GIOVANNI ARNOLFINI Y SU ESPOSA, pintado al óleo sobre un tablero de roble por Jan van Eyck en 1434, es para el artista David Hockney una prueba de que los pintores del primer Renacimiento lograron el asombroso realismo que caracteriza sus cuadros silueteando las imágenes proyectadas por lentes o espejos y rellenando luego con pintura los contornos. El autor plantea dificultades técnicas que ponen en entredicho esta teoría. En las páginas siguientes examina diversos detalles del cuadro de Van Eyck (*resaltados*).

Optica y realismo en el arte renacentista

Para explicar el realismo de la pintura del siglo XV se avanzó una hipótesis que ha gozado de notable predicamento. A tenor de la misma, se habría conseguido gracias al uso de proyecciones con espejos. Los últimos análisis ponen esa idea en entredicho

David G. Stork



RETRATO DE GIOVANNI ARNOLFINI Y SU ESPOSA, JAN VAN EYCK, 1434 © GALERIA NACIONAL, LONDRES (*en esta página*); DE "REFLECTIONS OF REALITY IN JAN VAN EYCK AND ROBERT CAMPIN" POR A. CRIMINISI, M. KEMP Y S. B. KANG EN *PROC. MEASURING ART: A SCIENTIFIC REVOLUTION IN ART HISTORY*, PARIS, MAYO-JUNIO 2003, Y EN *HISTORICAL METHODS*, VOL. 36, Nº 3; VERANO DE 2004 (*reflexión rectificada en el espejo pintado de Van Eyck*); © GALERIA NACIONAL, LONDRES (*reflectograma por infrarrojos de la mano*); ELIZA JEWETT (*líneas de perspectiva*)

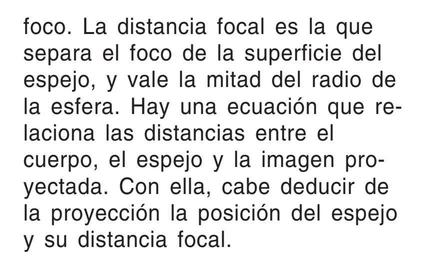
Llama la atención el cambio que experimentó la pintura en los albores del Renacimiento. Hasta 1425, más o menos, las imágenes pictóricas eran estilizadas, casi esquemáticas. Y de pronto, aparecieron cuadros de un realismo fotográfico. Así, en el *Retrato de Giovanni Arnolfini y su esposa*, del maestro del primer Renacimiento Jan van Eyck (1390?-1441), se logran una sensación de espacio, una presencia, una individualidad y una profundidad psicológica ausentes en obras más antiguas. Los retratos por fin se nos parecían. ¿Qué había ocurrido?

En su afán por explicar la aparición de esta nueva escuela —a la que, por analogía con la tendencia musical de finales de la Edad Media, se le ha dado el nombre de *ars nova*—, David Hockney, famoso pintor de nuestros días, elaboró en 2001 una teoría audaz, polémica: el realismo de las pinturas renacentistas —su "efecto óptico", como dice él— se conseguía mediante lentes y espejos que proyectaban, en lienzos u otras superficies, imágenes a las que se silueteaba y daba color.

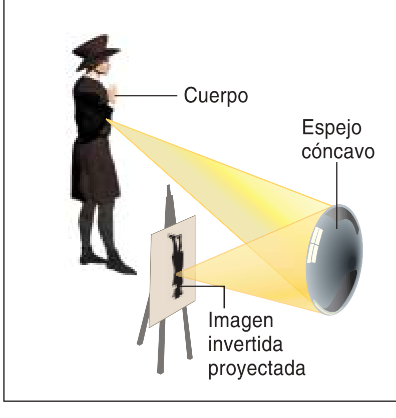
Es bien sabido que hubo pintores que utilizaron la proyección óptica sobre lienzo en los siglos XVIII y XIX. La teoría de Hockney sitúa el origen de esta práctica doscientos cincuenta años atrás, por lo menos. Tanta importancia le da a los instrumentos ópticos, que sostiene que la historia del arte de aquella época guarda estrecha relación con la evolución de la óptica.

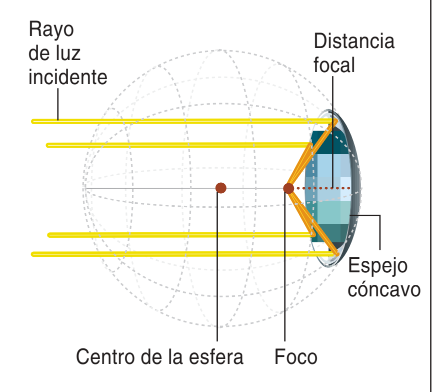
Con el fin de valorar esta hipótesis, varios investigadores hemos aplicado técnicas ópticas y de vi-

FUNDAMENTO DE LA PROYECCION POR ESPEJO



Los espejos cóncavos proyectan la imagen invertida de un cuerpo en una pantalla colocada a cierta distancia (*debajo a la izquierda*). Se los puede considerar secciones de esfera (*debajo a la derecha*). Los rayos de luz incidentes paralelos al eje del espejo convergen, una vez reflejados, en un punto llamado foco. La distancia focal es la que separa el foco de la superficie del espejo, y vale la mitad del radio de la esfera. Hay una ecuación que relaciona las distancias entre el cuerpo, el espejo y la imagen proyectada. Con ella, cabe deducir de la proyección la posición del espejo y su distancia focal.





ELIZA JEWETT Y TOMMY MOORMAN

sión informatizada a dos de los cuadros de Van Eyck que Hockney y su colaborador Charles Falco, físico de la Universidad de Arizona, presentan como prueba. Seguidamente se exponen los resultados de nuestro análisis, representativos de un amplio conjunto de objeciones razonadas.

Proyección en espejos

Hockney afirma que ya en 1425 hubo artistas que pintaron sus cuadros con ayuda de una primitiva "cámara oscura", artilugio precursor de la cámara fotográfica, aunque, claro está, sin cargar película alguna. Consiste en que una lente convergente proyecte sobre una pantalla la imagen real invertida de una escena. (Se llama "real" a una imagen proyectada porque la luz incide realmente en la pantalla, como sucede en la exposición de una película fotográfica. En una imagen virtual, la que vemos en un espejo, por ejemplo, sólo parece que la luz proceda de ella.)

Por una serie de razones históricas y técnicas, Hockney concibe una cámara oscura que en vez de lente utiliza un espejo cóncavo (curvado hacia adentro, como los espejos de aumento para el cuarto de baño), que también puede proyectar una imagen real en una pantalla. El artista iluminaría con luz solar el objeto que debiese pintar y orientaría el espejo hacia él, de tal modo que se proyectara una imagen real invertida sobre un lienzo o tablero de madera de roble, el soporte del futuro cuadro. A continuación dibujaría los contornos de esa imagen y aplicaría luego la pintura, o quizá pintaría directamente sobre la misma imagen proyectada, aunque, como el propio Hockney reconoce, resulta sumamente difícil.

Construir una cámara oscura de este género sería hoy muy sencillo, pero en los tiempos de Van Eyck hubiera significado crear el mejor dispositivo óptico del mundo; ningún sistema conocido por entonces exigía tal precisión en la configuración y colocación de espejos, ni le pedía tanto a la iluminación. Que yo sepa, no hay escritos de científicos, artistas, comerciantes, clérigos o fabricantes de espejos de aquella época donde aparezca el menor indicio ni siquiera de que alguien hubiese visto en una pantalla la imagen de un objeto iluminado, proyectada por un espejo o una lente. La falta total de testimonios sobre el supuesto proyector de Hockney sería difícil de explicar, dada la abundancia de documentación sobre todo tipo de sistemas ópticos e instrumentos mecánicos que auxiliaban a los dibujantes.

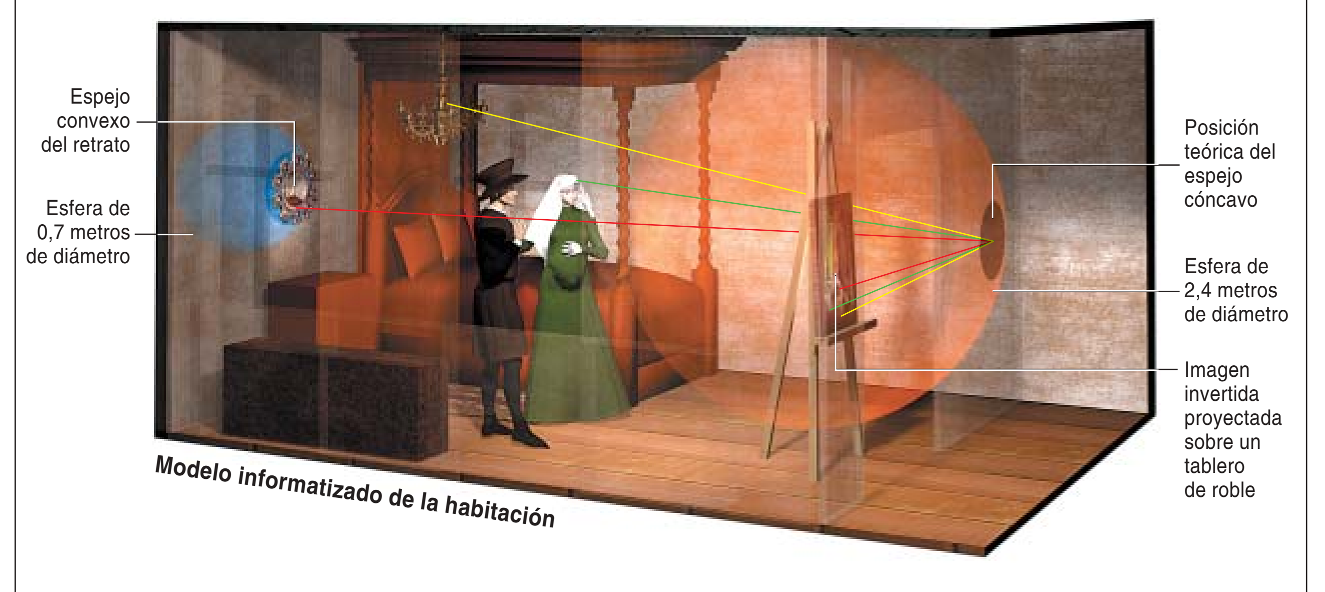
Propiedades

Pasemos a examinar tres propiedades esenciales de un proyector de espejo cóncavo. La primera es la distancia focal: un espejo cóncavo refleja los rayos de luz paralelos al eje de tal modo que se concentren en un punto, el foco (para encender un fuego con la luz del Sol reflejada por el espejo, habría que poner la yesca ahí). Se llama distancia focal la que media entre el foco y la superficie del espejo. Una fórmula matemática —la ecuación del espejo— expresa cuánto pueden separarse del espejo el objeto y el soporte donde se proyecta su imagen para que ésta salga nítida. A su vez, estas distancias determinan el tamaño de la imagen proyectada. Por ejemplo, para agrandar la imagen fotográfica de objetos lejanos escogemos un objetivo de larga distancia focal (un teleobjetivo), mientras que para abarcar un campo muy amplio nos valemos de un objetivo de corta distancia focal (un gran angular u "ojo de pez"). La segunda propiedad se refiere al brillo de la imagen proyectada, que depende de la distancia focal y del área del espejo donde se forma la imagen. La tercera propiedad es la perspectiva geométrica: la imagen proyectada por un espejo obedece a las leyes de la perspectiva, igual que las cumple una imagen proyectada que impresione una película fotográfica.

El cuadro de Van Eyck *Retrato de Giovanni Arnolfini y su esposa* (1434), una de las primeras obras maestras del Renacimiento del norte de Europa, es una pieza esencial de la teoría de Hockney. Mucho habría que decir sobre el significado y simbolismo de esta extraordinaria pintura, pero solamente nos ocuparemos de una reducida zona (menos de un decímetro cuadrado) que cae por su centro. Los historiadores del arte debatirán sobre el sentido que subyace bajo la captación del mundo real en el espejo convexo de la pared trasera, pero aquí nos interesan sus propiedades ópticas: la distancia focal y su capacidad de concentrar la luz. Mientras los expertos analizan la espléndida lámpara colgada como signo de la riqueza e importancia social del mercader Arnolfini, un italiano establecido

EL ESPEJO DE LA HABITACION DE ARNOLFINI

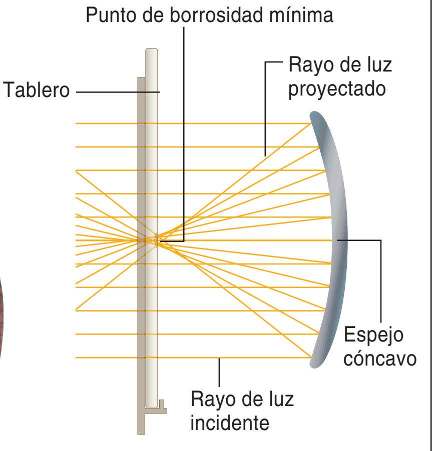
Para someter a prueba la hipótesis de Hockney —que si el espejo convexo presente en el cuadro de Van Eyck se hubiera metalizado por el reverso, una vez dado la vuelta habría servido como espejo cóncavo proyector—, el autor empezó por conjeturar los tamaños de los objetos y su posición en la habitación. Seguidamente, utilizó las reglas de la óptica geométrica para determinar ubicaciones del espejo de proyección y del caballete que pudiesen generar los tamaños mostrados en el cuadro de Van Eyck (*abajo, un modelo informático*). Por último, aplicó la ecuación del espejo para hallar su distancia focal, que resultó ser de unos 61 centímetros. Si se hubiera cortado de una esfera, ésta habría debido tener un diámetro de 2,4 metros (*esfera en rojo*). El examen de las imágenes formadas en el espejo de la pared posterior (*abajo a la izquierda*) demuestra que su distancia focal ronda los 18 centímetros, por lo que podría haberse obtenido de una esfera con un diámetro de 0,7 metros (*esfera en azul*). Es, pues, evidente que el espejo convexo del cuadro, vuelto al revés, no podría haber servido como espejo cóncavo de proyección. Otros cálculos y ensayos revelan que la iluminación indirecta de la habitación de Arnolfini era demasiado tenue para proyectar una imagen que se pudiera siluetear y que cualquier imagen proyectada sería demasiado borrosa para reproducir los detalles más finos (*abajo a la derecha*).



Modelo informatizado de la habitación

Para hallar la distancia focal del espejo pintado por Van Eyck, el autor aplicó un método informático desarrollado por Antonio Criminisi, de Microsoft Research en Cambridge, Martín Kemp, de la Universidad de Oxford, y Sing-Bing Kang, de Microsoft Research en Redmond. Pudo así ajustar el radio de curvatura del espejo para deshacer la combadura de la imagen pintada, es decir, para que pareciesen rectas las vigas, marcos de puertas y demás elementos. El radio de curvatura hallado de este modo demuestra que la distancia focal del espejo pintado es del orden de 18 centímetros.

Imagen del espejo corregida en distorsión

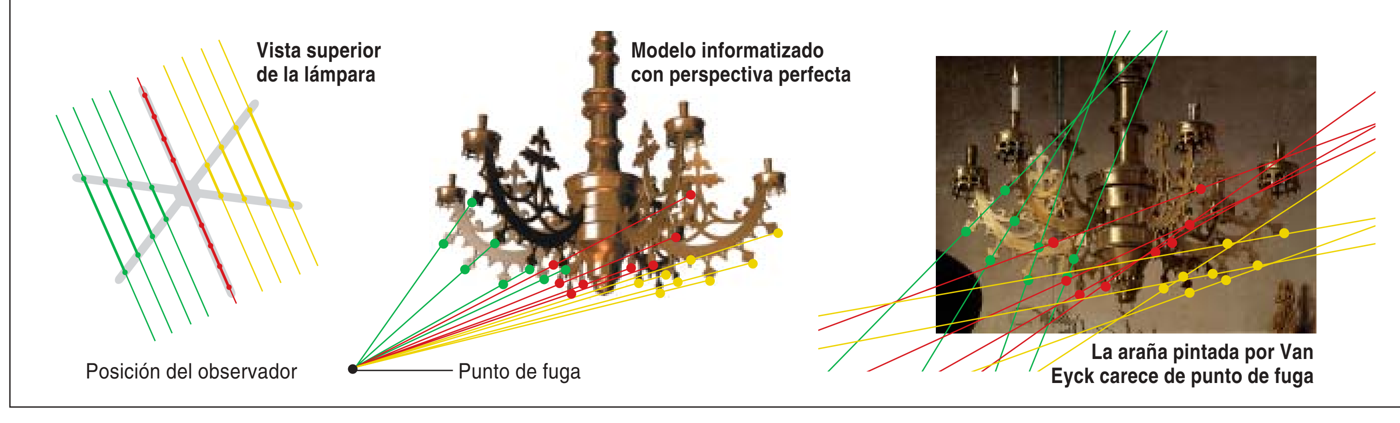


Si se hubiera vuelto del revés el espejo convexo del cuadro de Van Eyck para que sirviese de proyector, su borrosidad mínima —la menor mancha luminosa en la pantalla procedente de un punto del cuerpo— habría tenido un diámetro cercano a un centímetro, demasiado grande para que se proyectaran los finos detalles que aparecen en el cuadro.

JAMES SCHOENBERGER Y DAVID G. STORK (*versión tridimensional de la habitación de Arnolfini*); ANTONIO CRIMINISI ET AL. (*corrección de la reflexión en el espejo pintado por Van Eyck*); ELIZA JEWETT Y TOMMY MOORMAN (*dibujos*)

LA ARAÑA

La teoría de la proyección óptica sostiene que la lámpara ornamental que se muestra en el retrato de Arnolfini se pintó con una perspectiva perfecta, como si se la hubiese delineado sobre una imagen proyectada. Para examinar tal supuesto, el autor sometió la lámpara a un análisis de perspectivas. Vista desde arriba (*izquierda*), la araña de seis brazos se da por cierto que presenta simetría hexagonal. Las estructuras correspondientes (*puntos en color*) de cada par de brazos definen líneas paralelas al suelo y perpendiculares al plano vertical que las corta por la mitad; todas esas líneas, como las aquí representadas, son mutuamente paralelas en el espacio. Si la lámpara física del cuadro hubiera sido simétrica, o próxima a la simetría, y se hubiese pintado con una perspectiva perfecta, las líneas paralelas convergerían en un punto de fuga (*centro*). Sin embargo, las líneas construidas de modo similar para el cuadro de Arnolfini (*derecha*) presentan una gran desviación. Por tanto, o bien la araña no se pintó sobre una imagen proyectada, o bien el modelo distaba mucho de ser simétrico.



DE IZQUIERDA A DERECHA: ELIZA JEWET (*dibujo, líneas de perspectiva*); JAMES SCHOENBERG Y DAVID G. STORK (*versión tridimensional de la lámpara*); JAN VAN EYCK, 1434 ©GALERIA NACIONAL, LONDRES (*detalle de la lámpara del retrato de Arnolfini*); ANTONIO CRIMINISI (*simulación por ordenador de los brazos de la lámpara*)

en Brujas, nosotros expondremos lo que nos revela esa estructura metálica acerca de perspectivas y proyecciones geométricas.

Con razón, los historiadores del arte nos advierten de que no tomemos demasiado al pie de la letra el retrato de Arnolfini, ni ninguna otra pintura de aquel tiempo. Sin embargo, para poder enjuiciar la teoría de la proyección habremos de adoptar provisionalmente la hipótesis de Hockney, esto es, que la pintura se basa en una copia fiel de una imagen proyectada.

Fijémonos primero en el espejo convexo, quizás el más famoso de la historia del arte. Estos espejos son muy frecuentes hoy en ciertas tiendas o en las entradas de coches sin visibilidad porque ofrecen un gran ángulo de visión. A diferencia de los espejos cóncavos, los convexos producen imágenes virtuales, no invertidas y menores que el objeto original, que no se pueden proyectar sobre un lienzo. Hockney, sin embargo, apunta que si la cara metalizada hubiese sido la opuesta, se podría haber dado la vuelta a ese espejo *convexo* para que valiese como espejo *cóncavo*; ningún instrumento más habría hecho falta para conseguir la riqueza de detalles y la apariencia tan natural del cuadro.

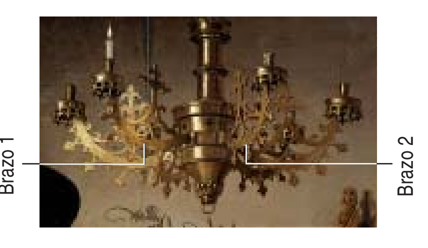
A fin de someter a prueba tal conjetura, calculamos la distancia focal del espejo que supuestamente se utilizó para la proyección y la del espejo cóncavo que se hubiera creado invirtiendo el convexo pintado en el cuadro. De la comparación de ambas distancias focales resulta que la del presunto espejo proyector sería de 61 ± 8 centímetros (la imprecisión se debe al imperfecto conocimiento de los tamaños y dimensiones de los enseres de la habitación), y de 18 ± 4 centímetros la del espejo cóncavo obtenido al volver el convexo al revés. Existe, pues, una diferencia de unos 43 centímetros entre esas distancias focales: el espejo del cuadro vuelto al revés no podría haberse utilizado como espejo de proyección para la pintura entera.

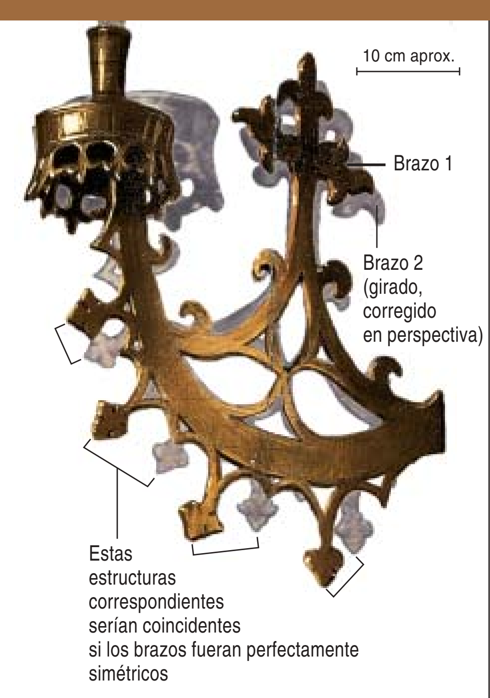
Más aún, la fabricación a partir de una esfera de vidrio soplado de un espejo que *sí hubiera podido* utilizarse sobrepasaba las posibilidades de la técnica en el Renacimiento. El diámetro de una esfera es el cuádruplo de la distancia focal de un espejo cóncavo cortado de la misma. Un espejo de proyección de 61 centímetros de distancia focal exigiría una gran esfera de 2,4 metros de diámetro. Además, un espejo que fuese una sección de una esfera perfecta produciría una imagen borrosa de cada punto de la habitación de Arnolfini; la imagen de un punto en el lienzo quedaría desdibujada, como un “borrón” que, según nuestros cálculos, sería varias veces mayor que los detalles más finos de la pintura. Cualquiera de las desviaciones inevitables en la fabricación empeoraría aún más la calidad de la imagen.

Los artesanos del Renacimiento, por otra parte, se habrían encontrado con dificultades técnicas considerables para azogar y sellar un espejo cóncavo, operación que requería aplicar alquitrán y pez calientes al vidrio por el dorso convexo. Que sepamos, ninguna colección conserva un espejo cóncavo que se construyese a partir de una esfera de vidrio, ni tampoco hay constancia documental de que nadie haya fabricado uno por ese procedimiento.

La inverosímil distancia focal que habría de tener el supuesto espejo proyector implica una segunda consecuencia, aún más restrictiva para la tesis de Hockney. Una vez descartados los grandes espejos esféricos de vidrio soplado, quedarían como única solución los espejos pequeños de metal pulimentado, ya conocidos en el siglo XV e incluso antes. Los espejos de esta clase,

Para investigar la posibilidad de que la lámpara real tuviera una asimetría notable, el autor y Antonio Criminisi representaron en el ordenador la lámpara pintada (*abajo*) y rotaron los brazos hasta superponer unos sobre otros (*a la derecha*, para dos brazos). El análisis reveló desviaciones de hasta 10 centímetros. Es poco probable tanta imperfección en la araña real, si nos guiamos por las mediciones realizadas en otras lámparas ornamentales contemporáneas y los análisis informáticos de sus fotografías.





sin embargo, tienen un escaso poder de concentración de la luz. Según nuestros cálculos, confirmados experimentalmente, unos espejos de distancia focal adecuada necesitarían que se iluminase el objeto con luz solar directa para producir una imagen visible sobre el soporte. Este requisito se compadece mal con la iluminación interior, manifiestamente indirecta, del retrato de Arnolfini y de otras muchas pinturas del primer Renacimiento que Hockney aduce en prueba de su teoría.

Una perspectiva diferente

Otras comprobaciones siembran dudas sobre la idea de que Van Eyck pintara el retrato de Arnolfini a partir de una proyección sobre el tablero de roble. Una imagen proyectada cumple las leyes de la perspectiva. Las líneas de perspectiva trazadas en el suelo, los marcos de las ventanas y otros elementos distintivos del cuadro no se encuentran, en cambio, en un punto de fuga como debieran. No se atienen a una perspectiva coherente.

Y por si fuera poco, una técnica, la reflectografía por infrarrojos, descubre bajo la pintura visible un boceto húmedo (un dibujo preliminar al óleo, en vez de a lápiz), con rectificaciones por casi todo el cuadro, especialmente en las manos, pies y cabeza de Arnolfini. No casa bien con que se hubiese pintado sobre una imagen proyectada.

Bajo la espléndida araña, o *lichtkroon* (en holandés, literalmente, *corona de luz*), no hay, sin embargo, dibujo preliminar alguno. Quizás esta difícil sección del cuadro fuera dibujada en un exterior mediante proyección, con la lámpara iluminada por luz solar directa. Según Hockney, la lámpara cumpliría a la perfección las leyes de la perspectiva, como si resultara de una proyección. Ciertamente, la imagen aparenta estar en perspectiva. Pero, ¿lo está?

Para abordar esta cuestión, empecé por trazar y prolongar líneas que unían estructuras correspondientes en los brazos de la araña pintada (*véase el recuadro* "La araña"). Las leyes de la perspectiva geométrica garantizan que en una proyección por espejo cóncavo de una lámpara simétrica sobre un soporte, todas las líneas paralelas se encontrarían en un punto de fuga, igual que en una fotografía unos raíles de tren se juntan en el horizonte. Pero las líneas que dibujé quedaron bastante desordenadas, como palos que hubiesen caído al suelo, y no dieron indicios de que hubiese un punto de fuga único bajo la araña.

Este resultado no excluye que Van Eyck tomase una lámpara *asimétrica* como fuente de la imagen proyectada. Pero ¿qué probabilidades hay de que la lámpara real que Van Eyck tomara como modelo fuese tan asimétrica?

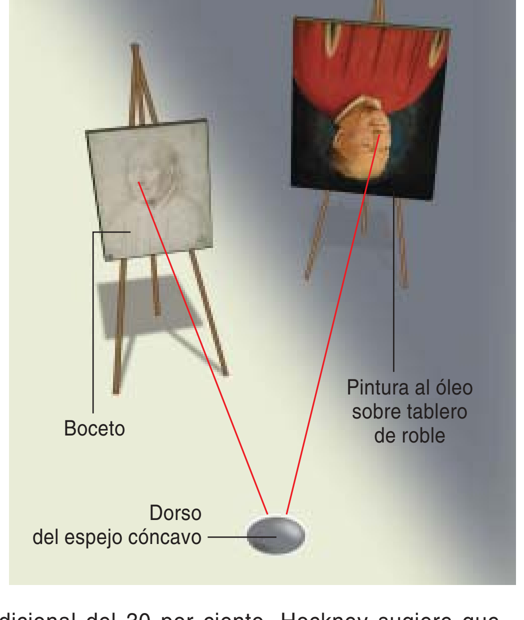
Para contestar la pregunta, Antonio Criminisi, de Microsoft Research en Cambridge (Inglaterra), y yo "deshicimos" la perspectiva, con su nuevo y riguroso algoritmo de visión informatizada, en cada brazo de la araña; luego colocamos las imágenes corregidas una sobre otra. Cualquier diferencia entre estos brazos tras la eliminación de los efectos de la perspectiva indicaría el grado de "torpeza" con que debería haberse construido la lámpara para que concordase con la teoría de la proyección. Descubrimos que, si bien hay partes bastante bien alineadas, en general las variaciones entre los brazos eran considerables, de hasta 10 centímetros.

La mayoría de los expertos creen que en la Europa de Van Eyck, los brazos metálicos de aleaciones de bronce y cobre se fundían por entero en un molde único; los detalles ornamentales no iban soldados ni remachados. En consecuencia, todos los brazos tenían proporciones muy similares. Criminisi y yo confirmamos la gran simetría de estas piezas metálicas aplicando nuestro análisis de perspectiva a la proyección verdadera —una fotografía moderna— de una *lichtkroon* de cuatro brazos del siglo XV. Los brazos corregidos según la perspectiva coincidían de maravilla; las diferencias máximas no pasaban del milímetro. Hemos realizado pruebas con varios candelabros y arañas de gran tamaño y complejidad exhibidos en los Reales Museos de Arte e Historia de Bruselas, y comprobamos que todos esos objetos presentan una simetría mucho mayor que la que habría de tener la lámpara de Arnolfini para satisfacer la tesis de Hockney.

La teoría de la proyección descansa sobre la creencia de que Van Eyck muy difícilmente podría haber logrado "a simple vista", sin la ayuda de proyecciones ópticas, tanta precisión en la perspectiva. Para valorar las posibilidades de alcanzar tal nivel de exactitud, pedí al artista británico Nicholas Williams

LA COPIA DEL CARDENAL ALBERGATI

Según Hockney, el pintor Van Eyck copió y amplió un boceto a punta de plata del cardenal Niccolò Albergati. Se sirvió de un epidiascopio primitivo, un instrumento para proyectar una imagen de una superficie plana a otra. El boceto (*a la izquierda del diagrama*) se habría colocado en un caballete bajo una intensa luz (probablemente solar). El tablero de roble estaría en otro caballete, muy en sombra (*a la derecha del diagrama*), de modo que fuese visible la tenue imagen invertida proyectada por el espejo cóncavo. Van Eyck siluetearía luego a lápiz la imagen proyectada, volvería el tablero del derecho y se pondría a pintar.





Si se reduce aproximadamente en un 40 por ciento el retrato al óleo de Albergati y se lo superpone al boceto a punta de plata (*izquierda*), ambos contornos coinciden milimétricamente, lo que confirma la alta fidelidad del sistema de copiado. Sin embargo, la oreja está en el óleo desplazada hacia la derecha y presenta una ampliación adicional del 30 por ciento. Hockney sugiere que Van Eyck empujó accidentalmente el boceto, el óleo o el espejo, y silueteó la imagen desplazada. El autor considera inverosímil que Van Eyck no advirtiera una desviación tan grande, y cree que para ampliar el boceto pudo utilizar un instrumento de dibujo, el compás reductor: dos piernas cruzadas que pivotan sobre un eje no situado en su punto medio. (El artista sitúa sobre el original dos puntas del compás, lo invierte y marca sobre la copia con las dos puntas opuestas la distancia que corresponda a la escala deseada.)





Richard Taylor, de la Universidad de Oregón, empleó un compás reductor para copiar el boceto a punta de plata de Albergati (*a la izquierda del todo*). Cuando se escaneó digitalmente su copia (*junto a estas líneas*) y se la superpuso a la imagen original, se vio que la fidelidad era muy grande, salvo en la región de la oreja. Esta anomalía podría atribuirse al propio instrumento: Van Eyck empezaría a copiar el lado izquierdo de la cara, marcando con el compás las separaciones entre la boca y la punta de la nariz, entre los dos ojos, y así sucesivamente. Pero el compás tiene una apertura limitada y el pintor no podría abrirlo lo suficiente para marcar la separación entre la barbilla y la oreja. Por eso, trasladaría esa distancia a simple vista al lado contiguo a la oreja y seguiría con el proceso. Así debió de desplazar la oreja con respecto a lo ya dibujado.

ARRIBA A LA IZQUIERDA Y CENTRO: COLECCIONES ESTATALES DE ARTE, DRESDE, GABINETE DE GRABADOS; *ARRIBA A LA DERECHA Y CENTRO*: *CARDENAL ALBERGATI*, JAN VAN EYCK, 1435, MUSEO DE HISTORIA DEL ARTE, VIENA; TOMMY MOORMAN (*gráfico, arriba a la derecha*); *ABAJO*: MICHELE TAYLOR (*izquierda*); RICHARD TAYLOR (*derecha*)

que pintara varias lámparas complicadas sin valerse de fotografías, medios ópticos o construcciones de la perspectiva. El análisis de sus cuadros reveló una perspectiva excelente —mejor que la lograda en la araña de Arnolfini—: un artista experto no necesita proyecciones para conseguir una buena perspectiva.

El cardenal Albergati

A continuación analicé el *Retrato de Niccolò Albergati*, obra también de Van Eyck. El artista dibujó primero, en tres días de 1431, un boceto del cardenal. Utilizó la técnica de la punta de plata, en la que se dibuja con un estilo o punzón metálico sobre un papel preparado; produce una imagen muy nítida. Sin duda se trataba del boceto preliminar de una obra más formal. Al año siguiente, ejecutó al óleo sobre tablero de madera una copia de mayores dimensiones; hubo de trasladar la imagen de una superficie plana a otra superficie plana, y ampliarlo.

Según Falco, el colaborador de Hockney, Van Eyck utilizó un proyector óptico para crear el cuadro al óleo. Sería un epidiascopio primitivo, o proyector opaco, con dos caballetes, uno de los cuales situaría el boceto bajo una iluminación brillante (seguramente la luz solar) y el otro dejaría en sombra el tablero de madera, quizás en un interior o bajo un toldo. Mediante un espejo

cóncavo se proyectaría en el tablero una imagen real invertida del boceto, sobre la cual silueteaSría Van Eyck su obra. Hockney y Falco basan su argumento en dos características de los retratos: su gran parecido (salvando el cambio de escala) y una discrepancia residual en la ubicación de algunas partes de la imagen, en particular la oreja (*véase el recuadro* "La copia del cardenal Albergati").

La oreja está desplazada 30 grados a la derecha en el óleo, y también se ha agrandado en un 30 por ciento (aparte de la ampliación cercana al 40 por ciento del cuadro en su conjunto). Hockney y Falco explican así la desviación: el pintor había dibujado parte de la imagen proyectada por el epidiascopio cuando accidentalmente movió el caballete del boceto, el del óleo o el espejo, y delineó el resto de la imagen ya desplazada.

No es muy satisfactoria su explicación. Si Van Eyck hubiera tropezado con sus trastos en mitad del trabajo, tendría que haber notado el desajuste entre la imagen desplazada que se proyectaba y los trazos que ya había pintado en el tablero. Como comprobación, yo mismo copié una reproducción del boceto por medio de un epidiascopio casero construido con un pequeño espejo cóncavo circular, bajo iluminación solar directa, y tras "tropezar" adrede con el artilugio me saltó a la vista un desajuste demasiado llamativo. Es inverosímil que Van Eyck, trabajando con todo cuidado en un encargo importante, no hubiese advertido semejante desviación.

El boceto a punta de plata pudo copiarse con ayuda de un instrumento de dibujo mucho más sencillo: un *Reductionszirkel* o compás reductor formado por dos piernas cruzadas que pivotan sobre un eje no situado en su punto medio. El artista sitúa sobre el original las dos puntas del compás, e invierte éste para marcar sobre la copia con las dos puntas opuestas la distancia que corresponda a la ampliación o reducción escogidas. A petición mía, Richard Taylor, de la Universidad de Oregón, construyó un compás reductor y preparó con él una copia ampliada del boceto de Albergati. Su precisión fue excelente, con desviaciones menores de un milímetro en casi toda la imagen. Curiosamente, la oreja se desplazó un poco, tal vez porque Taylor empezó por el extremo inferior izquierdo y la abertura limitada del instrumento indujese el error.

En busca de la causa

Si, como parece, Jan van Eyck no utilizó instrumentos ópticos en la ejecución de sus obras, habremos de volver a la pregunta inicial: ¿por qué razón aumentó hacia 1425 el realismo de la pintura renacentista, fenómeno del que tal vez sea Van Eyck el mejor exponente? Suele aducirse un extenso repertorio de motivos, técnicos y culturales. Incluso puede haber razones ópticas.

El óleo empezó a utilizarse en el primer Renacimiento. A menudo se considera a Van Eyck padre de esa técnica. Con la opaca pintura al temple del arte medieval era casi imposible lograr la gradación de tonos que produce un efecto tridimensional. El óleo permitió en cambio la gradación continua y novedosas técnicas de veladura y estratificación, además de ofrecer una gama de colores expandida que comprendía tonos mucho más vívidos y saturados. Pero acaso la propiedad más importante de las pinturas al óleo fuese que se secaran mucho más despacio que las anteriores: el artista contaba con meses o años para elaborar y enmendar su obra.

Más o menos al mismo tiempo, los artistas italianos ideaban la perspectiva lineal. Este sistema matemático se basa en una línea de horizonte y un "punto de fuga" hacia el que convergen los "rayos visuales", las "ortogonales". Así se recreaba sobre una superficie plana la ilusión de espacio y distancia; el realismo de las escenas era, por consiguiente, mucho mayor. Por otra parte, los artistas empezaron a estudiar los cadáveres y mejoraron sus conocimientos de las estructuras musculares y óseas.

Numerosas fuerzas culturales prepararon, además, el terreno para el nuevo arte. El Renacimiento fomentó la secularización y el ideal clásico de centrarse en el ser humano en un lugar y una época concreta. También tuvo su importancia la extensión del mecenazgo: los pintores renacentistas tenían que representar a una persona determinada y sus posesiones. Si el retrato de Arnolfini no era fiel o lisonjero, el poderoso cliente rechazaría al artista.

Christopher W. Tyler, del Instituto de Investigaciones Oculares Smith-Kettlewell, en San Francisco, ha sugerido una razón "óptica" del acrecentado realismo muy ajena a las de Hockney: el mayor uso de las gafas. Tal vez los artistas que necesitaban —y usaban— gafas podían ver con mayor claridad, especialmente al pintar detalles. En el cuadro de Van Eyck *Virgen con el canónigo Van der Paele* (1436) se muestra al donante con gafas. Del brillante golpe de luz en una de las lentes, deduzco que eran convergentes, como las que ayudarían a leer a personas de vista cansada o a artistas hipermétropes que hubiesen de pintar detalles muy finos. En palabras de Hockney, parece que los pintores occidentales se hubiesen puesto gafas por primera vez en los albores del Renacimiento. Y quizá tenga más razón de lo que se imagina.

El autor

David G. Stork es profesor de la Universidad de Stanford.

Bibliografía complementaria

OPTICS AT THE DAWN OF THE RENAISSANCE. David Hockney y Charles M. Falco en *Proceedings of the Annual Meeting, Optical Society of America*, Tucson, Arizona, 2003.

DID THE GREAT MASTERS USE OPTICAL PROJECTIONS WHILE PAINTING? PERSPECTIVE COMPARISON OF PAINTINGS AND PHOTOGRAPHS OF RENAISSANCE CHANDELIERS. Antonio Criminisi y David G. Stork. International Conference on Pattern Recognition, Cambridge, Inglaterra, 23-26 de agosto de 2004.

REFLECTIONS OF REALITY IN JAN VAN EYCK AND ROBERT CAMPIN. Antonio Criminisi, Martin Kemp y Sing-Bing Kang en *Historical Methods* (en prensa).





Dinosaurios árticos de Alaska

Hace entre 75 y 70 millones de años, unos poderosos dinosaurios medraban en las tierras que hoy forman el norte de Alaska. Debieron adaptarse a unas duras condiciones climáticas

Anthony R. Fiorillo

Arrodillado en el yacimiento, pasaba una y otra vez la escobilla limpiadora cuando salió de repente un hueso, nada menos que el hocico de *Pachyrhinosaurus*, un extraño dinosaurio con cuernos, pariente lejano del *Triceratops.* No era el primer fósil de este animal que se hallaba en Alaska. Ni siquiera el segundo. Sin embargo, conservaba partes del cráneo ausentes en los otros.

Reanudamos las excavaciones. Se conjugaban los trabajos de pico y pala con la remoción suave de las escobillas. Recuperamos huesos y dientes de tres géneros de dinosaurios más. Tardaría un año en comprender que bajo nuestros pies se hallaban también los restos de otros siete cráneos de *Pachyrhinosaurus*. Tenían una edad similar; probablemente, murieron a la vez, fuera por una inundación u otra catástrofe. Esa agregación de fósiles constituía una primera prueba del comportamiento gregario de los dinosaurios árticos.

Llegué a este remoto yacimiento, situado en un acantilado sobre el río Colville, en el verano de 2002. Me acompañaban paleontólogos del Museo de Historia Natural de Dallas, de la Universidad Metodista del Sur y de la Universidad de Alaska. El objetivo: excavar un cráneo de *Pachyrhinosaurus* que había localizado un año antes. El mérito del descubrimiento

LARRY FELDER

1. EL *TROODON*, UN DEPREDADOR, dominó Alaska durante el Cretácico. De dos a tres metros de longitud, el dinosaurio observaba el mundo con dos ojos enormes. Quizás ello le convirtió en un temible cazador durante los largos meses de penumbra en el círculo polar ártico.

originario del yacimiento correspondía a científicos de la Universidad de Alaska. Ahora, un decenio después, sospechábamos que podría encerrar una abundante y valiosa acumulación de dinosaurios fósiles.

Nadie ha dado todavía, en ese yacimiento o en cualquier otro de Alaska, con un esqueleto entero de dinosaurio. Sí hemos logrado, en cambio, identificar esqueletos parciales, huesos aislados, dientes y huellas fósiles de ocho tipos de dinosaurios que vivieron durante la misma época en la región norte. Pertenecen todos al Cretácico, que transcurrió en el intervalo entre hace 145 y 65 millones de años. La mayoría proceden de la última época de este período —hace entre 75 y 70 millones de años—, unos cinco millones de años antes de que se produjese la extinción de los dinosaurios.

Aunque nuestro trabajo se halla todavía en una fase inicial, disponemos de datos que arrojan luz sobre los tipos de dinosaurios que medraron en el polo norte hace millones de años y sobre su adaptación a un medio tan inhóspito.

Reparto de actores

Cuatro de los géneros hallados eran herbívoros; otros cuatro, los terópodos, predadores de los anteriores y de otros animales. La mayor riqueza de restos de estos dinosaurios se halla en la Ladera Norte. El *Edmontosaurus*, un hadrosaurio, es el más abundante y, por tanto, el que mejor conocemos. Los hadrosaurios, herbívoros de gran tamaño, se denominan también "pico de pato" por la forma de su hocico, plano y ancho. Pero, a diferencia de los patos, contaban con cientos de dientes que les permitían masticar las plantas con las que se alimentaban. Para alcanzar las ramas más altas se servían de las patas traseras, que les permitían mantenerse erguidos. Para desplazarse, en cambio, utilizaban las cuatro extremidades; dado que sus patas posteriores eran más largas que las anteriores, su andar debía resultar tambaleante.

Un gran número de los hadrosaurios hallados en yacimientos de otros países mostraban en su cabeza ornamentaciones diversas o crestas, pero no el *Edmontosaurus*. Su peso oscilaba entre 1400 y 1800 kilos, lo que lo sitúa entre los mayores hadrosaurios de América del Norte. Como otros hadrosaurios, los *Edmontosaurus* eran gregarios: vivían en manadas. Ello se deduce de las grandes acumulaciones de huesos encontrados en diferentes yacimientos del norte de Alaska, prueba de que murieron en masa, arrastrados quizá por una riada.

Todos los dinosaurios descubiertos en Alaska han aparecido también en otros lugares de América del Norte; no podemos, pues, hablar de ningún dinosaurio específico de Alaska. Lo que sí distingue Alaska de otras regiones es el número de especies halladas, claramente menor. Este descenso de la biodiversidad con el aumento de la latitud sigue el patrón observado en las poblaciones animales actuales; lo mismo que hoy, puede que respondiera a la escasez de recursos que ofrecen las latitudes superiores.

Además de Alaska, los dinosaurios medraron en otros ambientes extremos. En el polo sur, el grupo dirigido por Judd Case, de la Universidad de Sta. María de California, ha descubierto fósiles de dinosaurios en yacimientos de antigüedad similar. Han recuperado restos fragmentarios de terópodos y hadrosaurios, entre otros. Patricia Vickers-Rich y Thomas Hewitt Rich, de la Universidad de Monash, han identificado dinosaurios que vivieron cerca del polo sur durante una época mucho más temprana [*véase* "Dinosaurios polares de Australia", por P. Vickers-Rich y Thomas Hewitt Rich; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1993].

¿Cómo llegaron hasta Alaska?

¿De donde procedían los dinosaurios que prosperaron en la punta septentrional del planeta? A buen seguro vendrían de Asia, porque en ese continente se han descubierto antepasados de casi todas las familias de dinosaurios cretácicos de Norteamérica. En su mayoría, los paleontólogos opinan que algunos de estos dinosaurios migraron a través de una masa de tierra, emergida por un descenso del nivel del mar donde hoy se halla el estrecho de Bering.

La distribución de las placas tectónicas durante el Cretácico sugiere que éstas formaron un istmo hace alrededor de 100 millones de años. En este período geológico, la conexión de las masas continentales se produjo al menos en tres ocasiones. Algunos de los inmigrantes debieron asentarse en estas tierras septentrionales simplemente porque encontraban allí recursos suficientes para cubrir sus necesidades; otros, en cambio, se dirigieron al sur. *Alamosaurus*, un dinosaurio herbívoro de unos 20 metros de longitud, siguió su propio albur: procedía del sur; se han encontrado fósiles de sus antepasados en América del Sur y en Africa.

Alaska está formada por enormes bloques geológicos. Aunque algunos de ellos proceden de lugares muy alejados, durante el Cretácico un gran número de estas masas terrestres se encontraban ya cerca de su latitud actual o incluso más al norte. Por tanto, los fósiles que hallamos en Alaska no corresponden a dinosaurios de otras latitudes que, una vez muertos, fueron transportados hasta aquí por los movimientos tectónicos de las placas; vivieron en tierras árticas durante el Cretácico. Pero, ¿permanecían allí todo el año? Y si es así, ¿cómo sobrevivían?

Vivir en una fría oscuridad

Para responder estas cuestiones necesitamos saber cómo era el clima

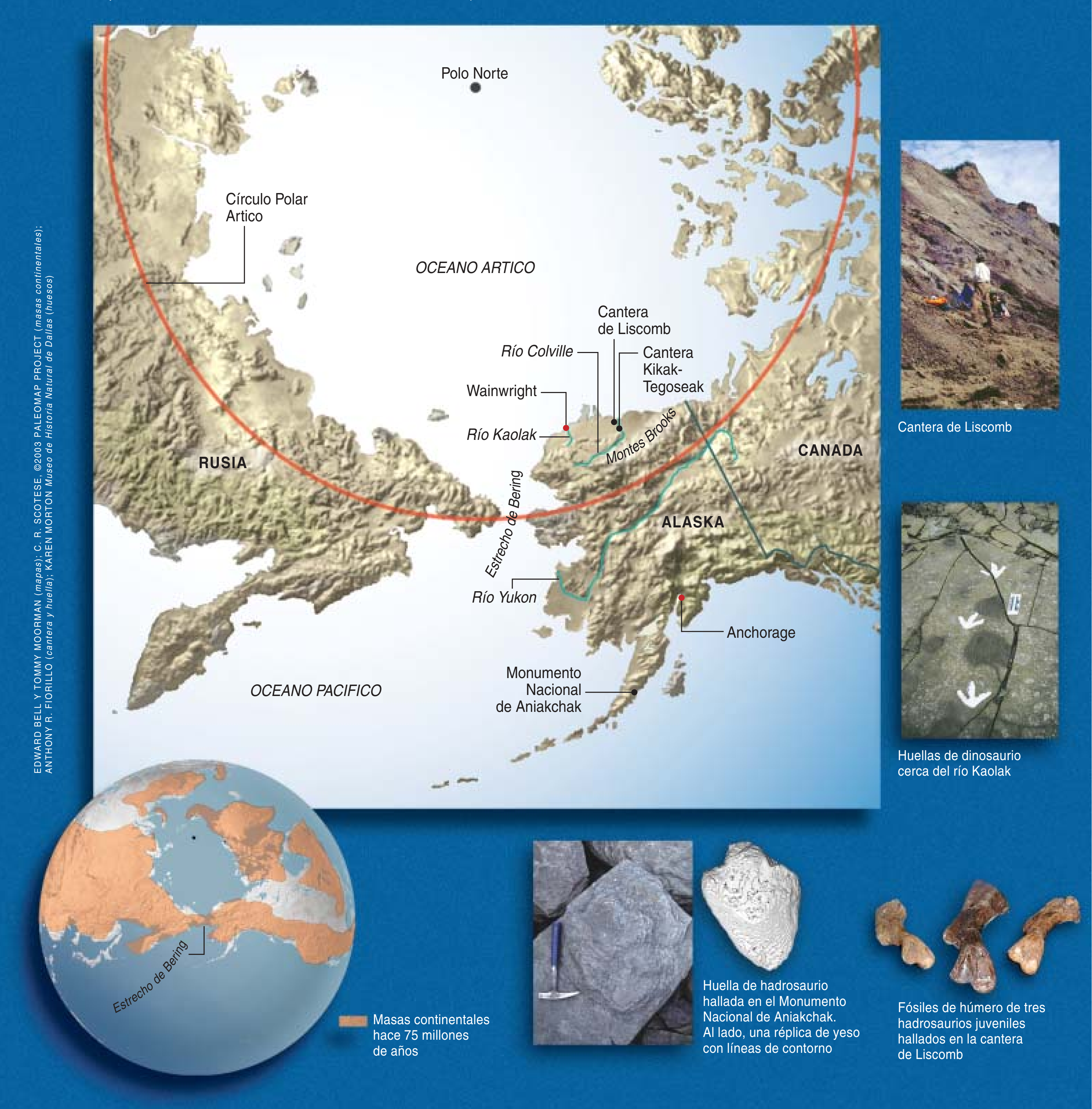
Resumen/Dinosaurios árticos

- En el curso de los últimos veinte años, los paleontólogos han descubierto que el norte de Alaska albergó una población de dinosaurios.
- Han hallado al menos ocho géneros de reptiles que medraron allí hace entre 75 y 70 millones de años.
- Estos dinosaurios se adaptaron a la vida de meses de oscuridad y frío intenso. Así lo avalan las pruebas emergentes.

DINOSAURIOS EN LA CIMA DEL PLANETA

Durante el Cretácico, hace unos 75 millones de años, las masas continentales (*de color naranja en el mapa inferior*) formaron un istmo, o lengua de tierra, donde hoy se encuentra el estrecho de Bering. Los dinosaurios atravesaron ese puente terrestre entre Asia y América del Norte. Algunos se establecieron en el lejano norte; otros se desplazaron al sur.

En la Alaska moderna, el autor y otros paleontólogos buscan los restos fósiles de los animales que medraron cerca del polo norte. Uno de los yacimientos con mayor riqueza fósil se halla en la cantera de Liscomb (*foto superior derecha*). Allí han aparecido fósiles de un grupo de hadrosaurios "pico de pato" juveniles (*huesos de la foto inferior derecha*), que debieron morir juntos, quizá por una riada. En un yacimiento próximo al río Kaolak se han descubierto las huellas de pequeños dinosaurios carnívoros (*foto a media página derecha*) —aparecen de color blanco porque se han llenado de silicona para obtener un molde. Otra huella (*foto inferior central*) se halló en el Monumento Nacional de Aniakchak en el sur de Alaska. Se fabricó un molde, en cuya superficie se marcaron líneas de contorno.



Cantera de Liscomb

Huellas de dinosaurio cerca del río Kaolak

Huella de hadrosaurio hallada en el Monumento Nacional de Aniakchak. Al lado, una réplica de yeso con líneas de contorno

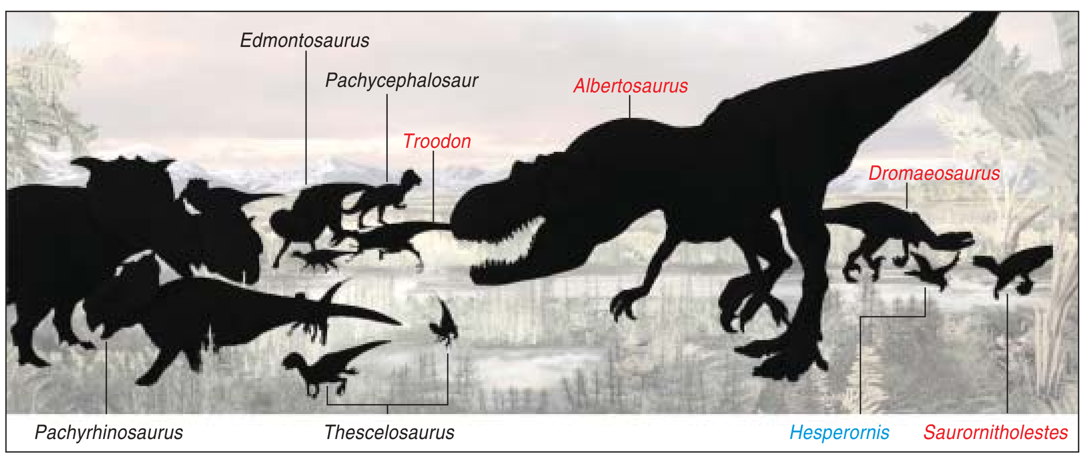
Fósiles de húmero de tres hadrosaurios juveniles hallados en la cantera de Liscomb

de Alaska hace entre 75 y 70 millones de años. Aunque la temperatura media del planeta superaba la actual, las latitudes elevadas se enfrentaban igualmente a inviernos fríos y nevados, con varios meses de oscuridad. Los datos climatológicos extraídos de polen, hojas y madera fosilizados indican que los bosques cretácicos del norte de Alaska constaban de una bóveda de coníferas de hoja caduca y un sotobosque de fanerógamas, helechos y cicadáceas. En la actualidad, los bosques mixtos de coníferas ocupan un amplio abanico de climas con temperaturas medias de entre 3 y 13 grados. Ello sugiere que la temperatura media anual del norte de Alaska durante el Cretácico debió ser similar.

En el Artico actual, el ángulo de incidencia de la luz solar y la duración del día toman valores extremos. Se suele decir que durante seis meses es de día y durante los seis restantes de noche. En realidad, las horas de oscuridad aumentan día a día hasta que en el solsticio de invierno (el 22 de diciembre) no sale el sol. Durante el Cretácico, el norte de Alaska se encontraba más al norte que hoy; así, los dinosaurios que medraban en estas tierras hubieran necesitado mecanismos para enfrentarse no sólo al frío, sino también a la oscuridad.

No sabemos cómo lograron sobrevivir. Por un lado, parece poco probable que un hadrosaurio de diez metros de largo cavara en el suelo un hoyo donde hibernar. Pero, por otro, durante períodos de estrés ambiental, algunos animales disminuyen la actividad metabólica lo suficiente como para reducir sus necesidades alimentarias. Quizá los dinosaurios árticos hicieron algo pa-





2. ALASKA, 75 millones de años atrás. Ocho tipos de dinosaurios, cuatro herbívoros (*nombres en negro*) y cuatro carnívoros (*nombres en rojo*), forrajeaban y cazaban en un paisaje salpicado de coníferas. Las montañas nevadas del fondo corresponden a la cordillera Brooks. En la parte inferior derecha un pájaro primitivo (*Hesperornis*) huye del pequeño depredador *Saurornitholestes*.

KAREN CARR

DESCUBRIMIENTO FORTUITO

En 1961, Robert L. Liscomb, geólogo que trabajaba para la compañía petrolera Shell, encontró varios huesos de un dinosaurio "pico de pato": un *Edmontosaurus*. Su estado de conservación era excepcional; sin embargo, puesto que ni Liscomb ni sus compañeros eran paleontólogos de vertebrados, atribuyeron los fósiles a mamíferos. Liscomb murió al año siguiente en un deslizamiento de tierra; las piezas que recuperó quedaron olvidadas en un almacén.

A mediados de los años ochenta, Henry Roehler y Gary Stricker, del Servicio de Inspección Geológica estadounidense (USGS), hallaron varios fósiles fragmentarios de dinosaurios, así como impresiones de piel de dinosaurio, en el norte de Alaska. A partir de entonces, el USGS se hizo cargo de la colección de huesos de Liscomb. Charles A. Repening los identificó correctamente: se trataba de restos de dinosaurios. Los expertos del USGS localizaron entonces el área donde Liscomb había realizado sus excavaciones.

A finales de los ochenta, el Museo de Paleontología de la Universidad de California y el Museo de la Universidad de Alaska continuaron los trabajos de excavación en esta zona remota, lo que ha proporcionado numerosos hallazgos de restos de dinosaurios y otros animales. En 1998 me invitaron a participar en el proyecto, en razón de mi interés por los dinosaurios que vivieron en latitudes altas. Desde entonces trabajo en todas las campañas anuales desarrolladas en la península.



CANTERA DE LISCOMB. El autor aparece en la excavación de un cráneo de *Pachyrhinosaurus*.

DAWN ROBERTS

recido, sin alcanzar un estado de auténtica hibernación.

Sugería Nicholas Hotton III que, durante el invierno, los dinosaurios se desplazaban miles de kilómetros en busca de forraje, temperaturas más cálidas y mejores condiciones luminosas. El caribú, una especie (moderna) que migra a largas distancias, abonaría, en la opinión de otros expertos, la tesis migratoria.

Para ahondar en la hipotética migración de los hadrosaurios, Roland Ganloff, del Museo de la Universidad de Alaska, y el autor decidieron analizar con mayor rigor la analogía del caribú. En primer lugar, medimos el tamaño del cuerpo de los individuos adultos y juveniles de tres manadas de caribú. Observamos que, cuando llega el momento de migrar, los jóvenes han alcanzado entre el 80 y el 85 por ciento de la longitud de los adultos y entre el 53 y el 74 por ciento del peso de los adultos.

A continuación, estudiamos los fósiles de hadrosaurios. La estructura celular de los huesos revela que los ejemplares pequeños correspondían a individuos jóvenes de al menos un año de edad; no pertenecían a ninguna especie de hadrosaurio enano de latitudes altas. La longitud de los huesos de los juveniles indicaba que habían alcanzado entre el 27 y el 37 por ciento del tamaño adulto y el 11 por ciento del peso adulto. Es decir, los hadrosaurios juveniles eran, en proporción, harto menores que los juveniles de caribú cuando inician la migración. Así pues, desde el punto de vista biomecánico, no parece probable que los hadrosaurios del Artico recorriesen largas distancias en su migración. Sin embargo, no hemos descubierto todavía nidos o huevos, hallazgo que constituiría una prueba concluyente de que los dinosaurios permanecían el año entero en estas elevadas latitudes.

Pero si se quedaban allí, ¿de qué se alimentaban durante los fríos meses de invierno? A tenor de los patrones de desgaste dentario, que no indican ningún cambio de dieta a lo largo del año, creemos que los dinosaurios carnívoros seguían consumiendo carne.

No sabemos a ciencia cierta qué comían los herbívoros. Sin embargo, el *Edmontosaurus* ofrece una posible pista. Este reptil habitó desde el norte de Alaska hasta el oeste de Texas. En la actualidad, existe otro vertebrado herbívoro con una extensión similar: la oveja *bighorn* de Norteamérica. La dieta de las ovejas de latitudes meridionales es menos variada que la de las que viven en latitudes altas; ello se deba quizás a que la mayor cantidad de recursos les permite restringir la variedad de alimentos. De forma análoga, las poblaciones más norteñas de *Edmontosaurus* podrían haber seguido una dieta



ANTHONY R. FIORILLO

3. UN HELICOPTERO DE LAS FUERZAS ARMADAS de EE.UU. eleva los restos de tres cráneos de *Pachyrhinosaurus* hallados en la cantera de Kikak-Tegoseak. Una cubierta de escayola protege los fósiles. Mientras se encontraban en una misión de entrenamiento, los militares acudieron en auxilio de los investigadores, que no lograban extraer tan pesado tesoro.

más generalista que las poblaciones del sur.

Si los dinosaurios no migraban, debieron desarrollar adaptaciones que les permitían vivir durante todo el año en latitudes altas. Se nos ofrece un ejemplo elocuente en *Troodon*, dinosaurio carnívoro de talla pequeña y conocido sobre todo por sus dientes; escasea en yacimientos de Alberta, Montana y Texas, más sureños. En Alaska, en cambio, abundan las piezas dentarias de ese saurio, lo que avala la hipótesis de una población extensa y ampliamente distribuida. Lo que diferencia a *Troodon* de otros dinosaurios depredadores es el extraordinario tamaño de sus ojos. Entre los animales modernos, tener los ojos proporcionalmente grandes suele constituir una adaptación a la oscuridad. Quizá *Troodon* estaba preadaptado a las limitaciones lumínicas de las latitudes altas; esto le confirió cierta ventaja evolutiva y le convirtió en el depredador más abundante de los ecosistemas septentrionales.

Pero si *Troodon* estaba tan preparado para los oscuros inviernos árticos, ¿cuál era su forma de vida durante los meses cálidos y luminosos del verano? Los bosques pudieron constituir su refugio. Cualquiera que, desde la luminosidad del campo abierto, se haya adentrado en un bosque frondoso se habrá dado cuenta de que allí reina la penumbra. En un ambiente donde la luz escaseara, los grandes ojos de *Troodon* le seguirían convirtiendo en un temible depredador.

No conocemos el tamaño de los ojos de otras especies de dinosaurios que vivieron en Alaska, pues sólo contamos con cráneos fragmentarios u otros fósiles todavía en proceso de restauración. En el caso de los dinosaurios que Tom y Pat Rich han descubierto en Australia, aunque distintos y más antiguos que los del polo norte, muestran también un aumento en el diámetro del hueso orbitario.

No está de más señalar que los especímenes de *Troodon* hallados en el Artico doblaban en tamaño corporal a los *Troodon* hallados en yacimientos más meridionales. Esta diferencia contrasta sobremanera con el patrón de los dinosaurios herbívoros: de las medidas de los huesos se infiere que los hallados en la Ladera Norte tenían el mismo tamaño que los de yacimientos de latitudes inferiores. Quizá los grandes ojos del *Troodon* constituyeran una ventaja evolutiva que le permitió convertirse en el mejor depredador e incrementar así su tamaño corporal. Lo mismo ocurre en los ecosistemas modernos. Por ejemplo, en las regiones donde los lobos han desaparecido, los coyotes han ganado en tamaño corporal.

¿Unicos supervivientes?

Todavía quedan muchas preguntas por responder acerca de estos seres extraordinarios. ¿Cabe la posibilidad de que hubieran sobrevivido a la catástrofe que al final del Cretácico extinguió los dinosaurios en el resto del planeta?

En su mayoría, los paleontólogos opinan que la colisión de un meteorito con nuestro planeta aniquiló los dinosaurios. El impacto se habría producido en el cráter mexicano de Chicxulub. Para ahondar en los efectos de largo alcance de este suceso debería estudiarse un área alejada del mismo; Alaska, por ejemplo. Para nuestro infortunio, hasta la fecha no hemos hallado en Alaska fósiles de dinosaurio que, por su edad, aclaren si la extinción fue brusca o gradual. Sin embargo, los pólenes fósiles de la Ladera Norte y de otros enclaves de Alaska indican que algunas de estas secciones geológicas sí cuentan con la antigüedad necesaria para arrojar luz sobre dicha extinción, siempre y cuando encierren, también, fósiles de animales. Esta posibilidad añade más alicientes a nuestra búsqueda. Por ahora, sólo hemos arañado la superficie.

El autor

Anthony R. Fiorillo defendió, en 1989, su tesis doctoral, que versó sobre paleontología de vertebrados, en la Universidad de Pennsylvania. Después de trabajar en el Museo Carnegie de Historia Natural y en el Museo de Paleontología de la Universidad de California en Berkeley, se trasladó a Dallas, donde comparte labores de gabinete en el Museo de Historia Natural de la ciudad con la enseñanza en la Universidad Metodista del Sur.

Bibliografía complementaria

ENCYCLOPEDIA OF DINOSAURS. Dirigido por P. J. Currie y K. Padian. Academic Press, 1997.

DINOSAURS: THE SCIENCE BEHIND THE STORIES. J. G. Scotchmoor, D. A. Springer, B. H. Breithaup y A. R. Fiorillo. American Geological Institute, 2002.

POLAR DINOSAURS. T. H. Rich, P. Vickers-Rich y R. A. Gangloff en *Science*, vol. 295, págs. 979-980; febrero 2002.

Ecofisiología

La lisa y la lebrancha en Baja California Sur

Las lisas medran durante la mayor parte de su ciclo de vida en el litoral de zonas templadas y tropicales asiáticas, europeas y americanas. Revisten suma importancia para el consumo local, pues constituyen una destacada fuente proteica para las poblaciones costeñas de países en vías de desarrollo, incluido México. En el litoral del Pacífico mexicano, se pescan principalmente dos especies: *Mugil cephalus*, a la que la población ribereña conoce como lisa, lisa rayada o lisa cabezona, y *M. curema*, comúnmente denominada lisa blanca o lebrancha. Aunque se capturan en cantidades elevadas, en años recientes la pesquería de estas especies ha mostrado síntomas de deterioro en esas costas, sobre todo en la Bahía y la Ensenada de La Paz, en Baja California Sur.

La lisa y la lebrancha presentan semejanzas en cuanto a sus características morfológicas, funcionales y reproductivas, hábitos alimentarios y uso del entorno. Su abundancia y éxito en ambientes costeros se explica por su resistencia a temperaturas extremas y a su capacidad de osmorregulación. La lisa tolera un rango de salinidad de 0 a 75 ppm y una temperatura de 10 a 35 ºC, siendo menos tolerantes los juveniles que los adultos. Aunque no se conocen a ciencia cierta los límites de tolerancia, la lebrancha se considera de manera empírica eurihalina (capaz de vivir en un amplio rango de concentración salina) y euritérmica (capaz de vivir en un amplio rango de temperaturas), en un grado similar a la lisa.

Pese a las semejanzas, la abundancia relativa de estas especies muestra una notable divergencia en el Pacífico mexicano. De acuerdo con los datos proporcionados por la Secretaría de Pesca mexicana, el 15 por ciento de la producción nacional de lisa proviene de Baja California Sur, mientras que este mismo estado aporta únicamente el 3 por ciento de la producción de lebrancha. ¿Qué es lo que hace que en esas costas, sobre todo en la Bahía y la Ensenada de La Paz, abunde más la lisa que la lebrancha?

La Bahía de La Paz constituye un sistema costero de suma importancia. La influencia marina conduce a una salinidad elevada, que puede alcanzar las 47 ppm; la temperatura llega hasta 36 ºC. En esa bahía encontramos la Ensenada de La Paz, un cuerpo de agua somero donde, debido a las altas tasas de evaporación, la salinidad y la temperatura exceden a las del resto de la bahía. De acuerdo con las investigaciones recientes, tales condiciones ambientales causan en la lebrancha una reducción de la tasa de crecimiento, del contenido energético y de la condición general. La disminución de la talla de los individuos se traduce en un mayor riesgo de depredación; constituye, por tanto, una desventaja en cuanto a la competencia con otras especies. La pérdida de valor energético de los tejidos refleja una disminución de la capacidad funcional del organismo.

Se ha detectado la presencia de ejemplares juveniles de lisa en ambientes con una salinidad de entre 10 y 47 ppm y una temperatura de entre 4,5 y 37 ºC; los juveniles de lebrancha, en cambio, se han hallado en entornos donde estos dos factores ambientales oscilan en un intervalo más estrecho: de 14 a 35 ppm y de 24 a 32 ºC, respectivamente. De ahí y de lo descrito anteriormente, se deduce que la lisa resiste las temperaturas y salinidades elevadas mejor que la lebrancha.

Puesto que los valores de salinidad y temperatura de la Bahía y la Ensenada de la Paz se hallan dentro del intervalo en que la lisa pero no la lebrancha se desempeña de manera eficiente, las diferencias entre la tolerancia ambiental de ambas especies explicaría las distintas abundancias relativas en esa región. Asimismo, si la lebrancha es más sensible a dichos factores, podría serlo también a la pesca excesiva, la depredación y otras presiones ambientales, que contribuirían a explicar la menor abundancia de esta especie.

GUILLERMINA ALCARAZ
Depto. de Ecología
y Recursos Naturales
Facultad de Ciencias,
UNAM, México D.F.



Debido a la temperatura y salinidad elevadas de la Bahía y la Ensenada de La Paz, en esas aguas abunda más la lisa que la lebrancha.

Primates fósiles en la Patagonia

Elementos para una filogenia de los Platirrinos

Los primates fósiles de la Patagonia tienen enorme relevancia para comprender la sistemática y filogenia de los primates neotropicales (infraorden Platyrrhini), especialmente por su antigüedad y diversidad. Sin embargo, los más antiguos registros —datados en 26 millones de años— no proceden de Patagonia, sino de Bolivia, si bien se trata de dos géneros con similares características y controvertidas afinidades con los restantes clados, fósiles o actuales. Por el contrario, para las provincias argentinas de Neuquen, Chubut y Santa Cruz, se han descrito ocho especies incluidas en seis géneros hallados en sedimentos del Mioceno inferior y medio. Los hallazgos recientes y más abundantes, a partir de la década de 1980, fueron producto de expediciones paleontológicas del Museo Argentino de Ciencias Naturales (Buenos Aires), Universidad de Stony Brook (Nueva York), Universidad de Duke (Carolina del Norte) y, recientemente, del LIEB (Laboratorio de Investigaciones en Evolución y Biodiversidad), de la Facultad de Ciencias Naturales, sede Esquel, provincia del Chubut. Cabe notar que los primeros hallazgos los realizó Carlos Ameghino a fines del siglo XIX, y fueron subsecuentemente descritos por su hermano, Florentino Ameghino.

En diversas regiones de la provincia de Santa Cruz (*véase la figura 1*) se hallaron cinco especies de platirrinos, con una antigüedad de entre 16,5 y 17 millones de años: *Soriacebus ameghinorum*, *Soriacebus adrianae*, *Carlocebus carmenensis*, *Carlocebus intermedius* y *Homunculus patagonicus*. Para Chubut, y con una antigüedad de aproximadamente 20 millones de años, se describieron dos especies: *Dolichocebus gaimanensis* y *Tremacebus harringtoni*. En Neuquen se hallaron restos de *Proteropithecia neuquenensis*, datado en 15,7 millones de años.

Todos estos primates son antiguos representantes de linajes que aún existen, entre ellos los sakis y uakaris de la tribu Pitheciini (*Pithecia*, *Chiropotes* y *Cacajao*), los mal llamados titíes, de la tribu Homunculini (*Callicebus*), el mono ardilla, tribu Saimiriini (*Saimiri*) y los mirikiná o monos lechuza, de la tribu Aotini (*Aotus*). Los Pitheciini se hallan representados en la Patagonia por *Soriacebus* y *Proteropithecia*; los Homunculini, por *Homunculus*; los Aotini, por *Tremacebus*; y los Saimiriini, por *Dolichocebus*. Los especímenes asignados a *Carlocebus* poseen dudosas afinidades, aunque originalmente se los vinculó a los Homunculini.

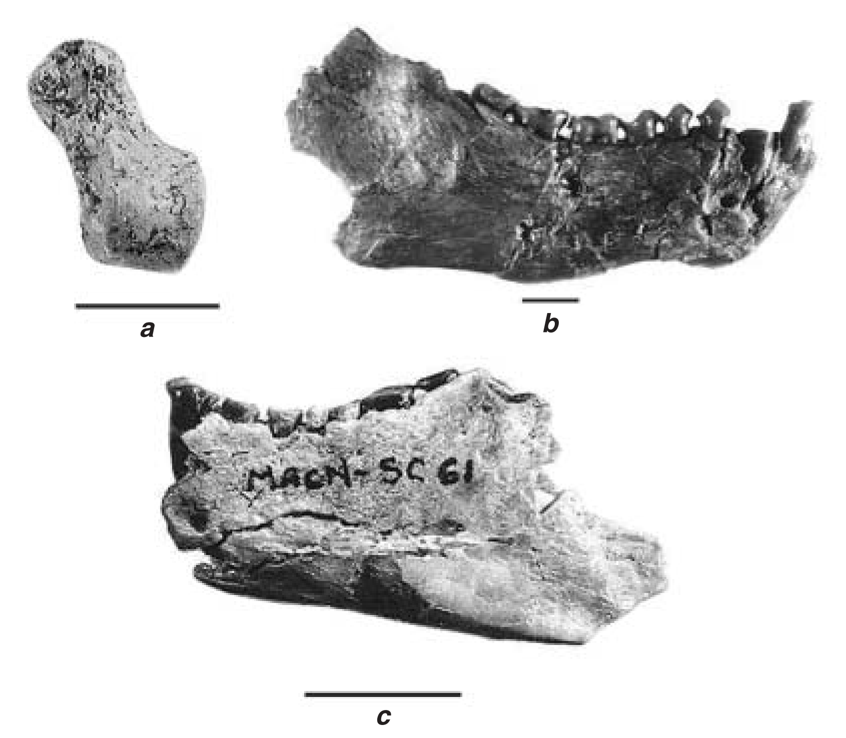
Los Pitheciini y Homunculini se reúnen en un clado monofilético, la subfamilia Pitheciinae, siendo las formas extintas patagónicas los más antiguos Pitheciinae registrados hasta el momento. Los Aotini y Saimiriini también tienen sus más antiguos registros en la Patagonia, y recientes trabajos del autor han dado cuenta de la presencia, en la provincia de Santa Cruz, de caninos aislados de posibles antiguos Alouattini, tribu que incluye a los actuales monos aulladores (*Alouatta*). Con este amplio registro, los primates patagónicos ofrecen un extraordinario panorama de la diversificación más antigua conocida para los platirrinos. Pero los hallazgos continúan.

En febrero del año 2000, en el transcurso de una expedición organizada desde el LIEB (Facultad de Ciencias Naturales, sede Esquel) y financiada por la Fundación L.S.B. Leakey, se halló un nuevo resto fósil de primate en Alto Río Cisnes, república de Chile, a unos cientos de metros de la frontera con la provincia del Chubut, en la Patagonia argentina. La región de Alto Río Cisnes tiene una notoria continuidad con el ambiente de la estepa patagónica, ya en las primeras estribaciones de la cordillera de Los Andes; los primates de la Patagonia Argentina y del sur de Chile habitaban paleoambientes semejantes, sin barreras geográficas significativas.

El hallazgo de Chile es un astrágalo hueso que articula con el pie en la porción distal del miembro posterior, y guarda semejanzas con otros astrágalos reportados para la Formación Pinturas, en la provincia argentina de Santa Cruz, y atribuidos a la especie *Carlocebus carmenensis*. La morfología del astrágalo determina que este primate tuvo una locomoción cuadrúpeda y arborícola, aunque con ciertos carac-



1. Depósitos sedimentarios de la Formación Pinturas, en el noroeste de la provincia de Santa Cruz, Argentina. En localidades fosilíferas correspondientes a esta formación se han hallado cuatro de las cinco especies de primates fósiles de esa provincia.



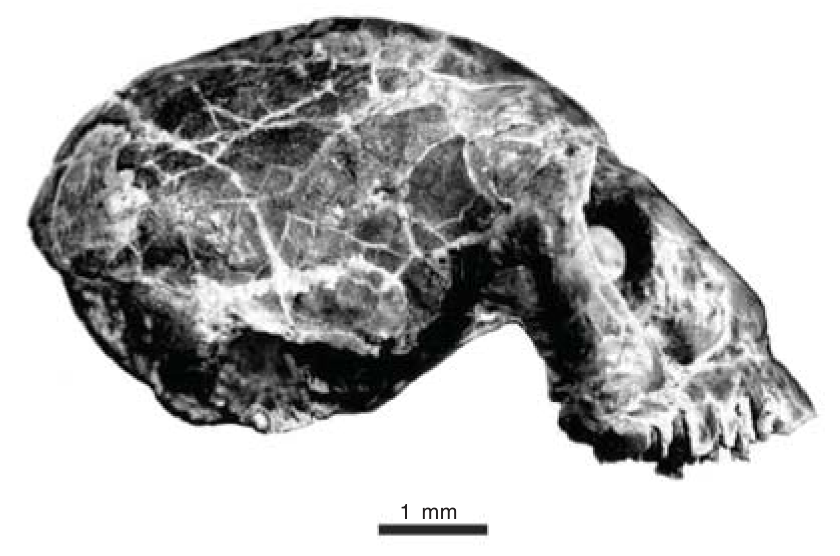
2. Vista dorsal del astrágalo de Alto Río Cisnes (*a*); mandíbula de *Homunculus patagonicus* (*b*), hallada por Carlos Ameghino a fines del siglo XIX en sitios costeros del sudeste de la provincia de Santa Cruz; mandíbula asignada a *Soriacebus ameghinorum* (*c*), procedente de la Formación Pinturas.

teres que sugieren incipientes hábitos saltadores. Este tipo de locomoción carece de las adaptaciones que posteriormente adquirieran los más derivados platirrinos, tal es el caso de los Pitheciini de hábitos saltadores, y los Atelini, braquiadores más extremos, por lo cual podríamos estar en presencia de un tipo de locomoción primitiva y generalizada para el infraorden. Este nuevo espécimen añade, además, una nueva localidad fosilífera con primates para la Patagonia, en este caso el sector chileno, y constituye el segundo registro de primates para Chile. Anteriormente, en el centro de Chile y muy distante de Alto Río Cisnes, se había indicado el hallazgo de *Chilecebus carrascoensis*, un cráneo extraordinariamente conservado que se relacionaría con los Saimiriini.

En diciembre de 2002, durante una nueva expedición paleontológica organizada desde el LIEB y con financiación de la Fundación L.S.B. Leakey, se recuperaron dos especímenes mandibulares de primates, uno de ellos atribuido a *Soriacebus ameghinorum*, el otro correspondiente a un nuevo género. Ambos se hallan aún en estudio, pero el espécimen de *Soriacebus* aporta datos relevantes para reafirmar el nivel taxonómico del taxón.

Otro importante enclave donde se han hallado platirrinos fósiles es la localidad de La Venta, en Colombia, unos 5 millones de años más moderna que los sitios de la Patagonia. Aquí pueden reconocerse taxones claramente relacionados a géneros actuales como *Alouatta*, *Saimiri*, *Pithecia*, *Aotus* e indudables representantes de los Callitrichinae, que incluyen a los más pequeños platirrinos, tities y tamarinos.

La clara diferenciación de clados actuales en La Venta está advirtiendo de una diversificación que tiene sus raíces en sedimentos más antiguos y, en consecuencia, la radiación inicial de los platirrinos está aún lejos de desvelarse. Los primates patagónicos relatan una historia muy particular, y las controversias surgidas en torno a las relaciones de ciertos taxones, tal es el caso de *Soriacebus*, se deben a lo primitivo de muchas adaptaciones que conducirían a los clados actuales. La Patagonia ofrece un extraordinario marco histórico para intentar reconstruir la filogenia de los platirrinos, y el hallazgo de nuevas localidades fosilíferas es crucial para incrementar no sólo la cantidad y diversidad, sino también el intervalo temporal del registro fósil.



3. Cráneo de *Dolichocebus gaimanensis*, procedente de la localidad de Gaiman, provincia del Chubut, y descrito originalmente en el año 1942.

MARCELO F. TEJEDOR
CONICET
Laboratorio de Investigaciones
en Evolución y Biodiversidad, LIEB
Facultad de Ciencias Naturales,
Universidad Nacional de la Patagonia
"San Juan Bosco"
Esquel, Chubut,
Argentina

Ansiedad y sobrealimentación

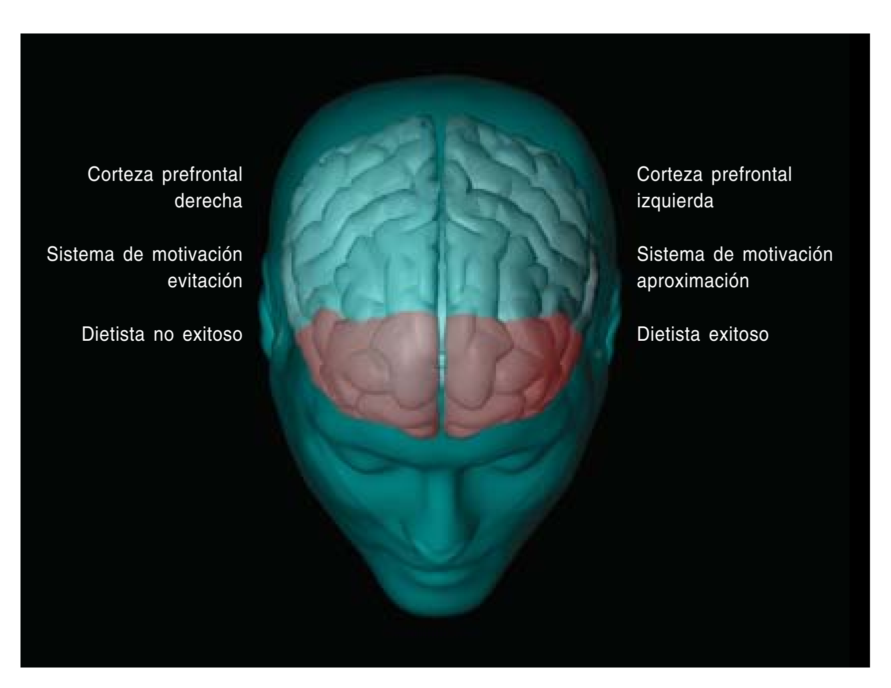
Comedores refrenados

Por comedor refrenado o seguidor de dieta crónico (DC) se entiende a un individuo que limita continuamente su alimentación por el miedo a subir de peso. Sin embargo, numerosas investigaciones han demostrado que, bajo ciertas condiciones, aumentan sus niveles de ingesta y se sobrealimentan. Entre esas condiciones se incluyen el consumo de una comida "prohibida", la ingesta de alcohol o experimentar estados emocionales intensos. El objeto principal del cúmulo de estudios desarrollados en torno a los DC ha consistido en esclarecer por qué una persona, que tiene como un importante objetivo de su vida el mantener su peso, termina por alimentarse de un modo descontrolado.

La influencia de las emociones en la desinhibición alimentaria ha despertado gran interés. Estudios de laboratorio que han inducido miedo, tristeza y ansiedad en los individuos experimentales ofrecen pruebas sólidas de que los estados ansiosos instigan la sobrealimentación. En concreto, los DC ingieren cantidades especialmente grandes cuando una fuente de estrés amenaza la identidad personal (por ejemplo, un fallo en una tarea cognitiva); no se exceden tanto cuando la amenaza es física (por ejemplo, un shock eléctrico). Los hallazgos indican que la ansiedad incrementa significativamente la ingesta en los DC sólo si está relacionada con la imagen que se hagan de sí mismos y con su autoestima. De este modo, las personas que inhiben su alimentación crónicamente y experimentan sensaciones de baja autovaloración, tienden a sobrealimentarse cuando se enfrentan a dificultades que les provocan ansiedad. Por ejemplo, es bien sabido que los adolescentes DC aumentan considerablemente el monto de alimentos consumidos durante los períodos de exámenes académicos. En las situaciones vitales que involucran el tener que afrontar adversidades les cuesta a estos sujetos manejar las experiencias emotivas (especialmente la ansiedad).

Así, se ha planteado que el descontrol de la alimentación está relacionado con una particular forma de regulación emocional. En concreto, se ha sostenido que los DC generalmente tienen una mala imagen de sí mismos (sobre todo por lo que se refiere a su apariencia física), de la que "escaparían" centrando su atención en la gratificación inmediata que proporciona la comida. También se ha defendido que los DC regulan sus sentimientos de ansiedad mediante un proceso de "enmascaramiento". Es decir, al vivir situaciones que amenazan su autoestima (por ejemplo, dar un discurso público o rendir un examen), romperían su dieta y atribuirían la ansiedad que experimentan a esto último. De este modo, se reinterpretaría (enmascararía) la ansiedad, logrando con ello aumentar la sensación de control sobre los acontecimientos de su vida ("mañana mismo retomo la dieta"). Sin embargo, lejos de ser una forma efectiva de regulación emocional, el enmascaramiento altera el comportamiento alimenticio y dificulta el desarrollo de habilidades que permitan enfrentarse a la fuente original de la ansiedad.

Recientemente, hemos hallado que los DC presentan un patrón de actividad cerebral congruente con su vulnerabilidad emocional. Estudios provenientes de la neurociencia afectiva han demostrado repetidas veces que la actividad cerebral tónica, es decir el grado en el cual un hemisferio o región del cerebro se encuentra activo en condiciones de reposo, está relacionada con el estilo afectivo. Los datos han revelado que la actividad tónica de la corteza prefrontal (CPF) guarda estrecha relación con las disposiciones anímicas, la reactividad emocional, la regulación de los afectos y los sistemas de motivación (de aproximación y evitación). En efecto, las personas con su CPF izquierda más activa experimentan estados anímicos más positivos y son más exitosos en regular sus afectos negativos (un sistema de aproximación preponderante). Por el contrario, las personas con su CPF derecha más activa tienen dificultades en regular sus emociones y experimentan con mayor frecuencia o intensidad emociones negativas como la ansiedad (un sistema de evitación preponderante). Tal como podría esperarse, este último patrón de actividad cerebral es el que caracteriza en términos generales a los DC. De este modo se ha conceptuado a los DC como personas vul-



Patrón de actividad cerebral.

nerables a la adversidad por tener un sistema de evitación muy sensible, que utilizan el enmascaramiento como una forma de regular las emociones negativas, fácilmente activadas en ellos.

Sin embargo, hallazgos recientes nos han permitido especificar más esta noción. Mediante el estudio de un grupo de estudiantes universitarios hemos mostrado que, aunque el predominio del sistema de evitación es característico de los DC, no en todos ellos ocurre así. Las variaciones en el predominio de los sistemas de motivación en la organización de la conducta tienen consecuencias diferentes para el consumo excesivo de alimentos.

Nuestros datos muestran que los DC con un sistema de *inhibición* más sensible se desinhiben en condiciones experimentales adecuadas. Sin embargo, los DC que tienen un sistema de *aproximación* más sensible logran inhibir su conducta alimentaria desordenada. Es decir, la conservación de la restricción alimenticia depende en gran medida del estilo afectivo del sujeto, donde a mayor sensibilidad al estrés mayor probabilidad de alimentarse con exceso.

Nos interesa en el futuro poder determinar si esta sensibilidad variable en los DC podrá estar relacionada con trastornos de la alimentación u obesidad. Aunque se ha mostrado que ser DC predispone a trastornos de alimentación, los estudios antes descritos nos permiten sugerir que probablemente los DC con un sistema de aproximación preponderante, que persisten en su inhibición frente a la ansiedad, tal vez pudieran estar predispuestos a desarrollar anorexia. Por otro lado, los DC con un sistema de inhibición preponderante, que son los que no logran moderarse, podrían estar predispuestos a desarrollar obesidad. En otras palabras, mediante la diferenciación de patrones distintivos dentro de la población con riesgo, esperamos establecer probables sendas de desarrollo de tales trastornos.

JAIME R. SILVA
Laboratorio de Neurociencia Afectiva y Psicopatología.
Universidad Mayor, Chile

Producción forestal

Aplicación de la biotecnología

La deforestación y la degradación constituyen los dos factores principales de la reducción de la superficie ocupada por los bosques. La FAO estima que alrededor de 11,4 millones de hectáreas de bosques se degradan anualmente, con un descenso estimado de la producción entre 6,2 y 7,0 millones de metros cúbicos por hectárea y año.

Sin que se produzcan aumentos significativos en la superficie forestal y, sobre todo, sin el incremento de su productividad, no se podrá cubrir el crecimiento de la demanda prevista. Ahora bien, si los bosques naturales no pueden abastecer la demanda mundial, parece que el camino alternativo y al mismo tiempo complementario debe ser el de la repoblación.

Hay que entender y aceptar que la actividad forestal para uso industrial se asimilará, cada vez más, a un proceso agrícola. Para que las plantaciones alcancen mayor rentabilidad económica, es preciso utilizar árboles con características superiores, obtenidas a través de procesos de mejora clásica, a través de procesos biotecnológicos o mediante una combinación de ambos.

Sólo en los últimos años se han aplicado los avances de la biotecnología a las especies forestales. Por una doble razón: el período de crecimiento del árbol y los métodos de regeneración disponibles. El árbol tarda años en alcanzar la madurez; por tanto, la inversión en investigación biotecnológica en el ámbito forestal no parece tan rentable como en otras especies. Por su parte, la biotecnología necesita sistemas de regeneración *in vitro* muy eficaces para asegurar el éxito de los trabajos de ingeniería genética; sin embargo, las especies forestales, en su mayoría, son recalcitrantes a la regeneración *in vitro*.

De todas las herramientas biotecnológicas disponibles, se aplican, sobre todo, la propagación clonal *in vitro*, los marcadores moleculares y la transformación genética. Veámoslas.

La clonación de genotipos seleccionados reviste interés si se dispone de árboles superiores, pues la progenie clonal mantendrá las características en razón de las cuales se seleccionó el árbol. Teniendo en cuenta que una plantación forestal necesita unos 1000 pies por hectárea, y sólo en Estados Unidos se plantan cada día entre 4 y 5 millones de árboles, resulta inmediato que la producción de material seleccionado necesita sistemas rápidos de propagación.

Entre tales sistemas se encuentran la regeneración *in vitro* (micropropagación). Los tres métodos de propagación *in vitro* que se aplican a la clonación forestal son la embriogénesis somática (formación de un embrión a partir de un tejido distinto de un gameto o del producto de una fusión gamética), la proliferación de yemas axilares y la inducción de yemas adventicias.

Los avances en el proceso de embriogénesis somática, junto con la posibilidad de multiplicar los embriones en biorreactores, avalan la eficiencia del sistema. En la mayoría de las coníferas se está utilizando esta técnica en combinación con la de la conservación de los embriones somáticos en nitrógeno líquido (crioconservación) durante el tiempo de evaluación de los clones en condiciones de campo. Los que muestren las mejores características serán rescatados del nitrógeno para su propagación en masa.

La técnica de la crioconservación, muy avanzada en coníferas, permite el desarrollo de la semilla artificial para la conservación de especies que producen semillas difíciles de preservar por métodos tradicionales. Nuestro grupo de trabajo está aplicando estas técnicas a roble, castaño y alcornoque.

Por lo que concierne a los marcadores moleculares, existen bases de datos con miles de secuencias génicas de árboles (coníferas y caducifolias) que pueden o podrán usarse para identificar diferencias en la expresión génica que ocurren en los procesos de diferenciación, en el estudio de la estructura de las poblaciones y su evolución, en el acortamiento del período juvenil,

etcétera. Por otra parte, las técnicas de propagación *in vitro* y las de crioconservación, juntamente con mutaciones puntuales, pueden originar cambios indeseables en el genotipo. La conformidad genética del material propagado *in vitro*, así como el crioconservado, precisa evaluarse mediante técnicas moleculares, como RAPD, RFLP, AFLP, microsatélites y otros.

¿Qué nos ofrece la tercera herramienta biotecnológica disponible, la transformación genética? Por su gran capacidad de regeneración *in vitro*, al chopo es la especie modelo a la que se recurre en los estudios de árboles transgénicos. Nos hallamos, sin embargo, ante un procedimiento reciente; de hecho, los ensayos más avanzados se encuentran todavía en fase de evaluación en campo.

De momento se están estudiando algunas modificaciones genéticas del chopo que pueden incidir en su tolerancia a los herbicidas, resistencia a los insectos, tolerancia al estrés abiótico, metabolismo de la lignina y control de la floración y esterilidad.

Por su relación con el control de malas hierbas, la tolerancia a herbicidas reviste particular interés durante los primeros años de desarrollo en vivero. Se hallan en fase de evaluación chopos resistentes al herbicida "Basta". Mediante la inserción de genes que codifican las toxinas Bt o proteinasas se han obtenido individuos resistentes a insectos. En el ámbito de la resistencia al estrés abiótico, se investigan genotipos tolerantes a los contaminantes atmosféricos (el ozono o el dióxido de azufre), la sequía, la salinidad y la toxicidad por metales pesados; en particular, nuestro grupo trabaja en la incorporación de genes que codifican fitoquelatinas sintasas, enzimas que promueven resistencia al estrés provocado por metales pesados en el suelo.

Se han caracterizado también genes y enzimas del metabolismo de la lignina que han permitido el desarrollo de árboles modificados genéticamente con una composición alterada de la lignina, un polímero crucial en la producción de pasta de papel. Con el control de la floración y esterilidad se pretende conseguir árboles transgénicos que desarrollen una floración precoz, para así adelantar los programas de mejora tradicional, y se sometan a una esterilidad inducida, para evitar la dispersión de polen contaminante a otros cultivos. Por último, es posible también modificar algunos parámetros relacionados con el crecimiento y desarrollo; por ejemplo, una mejor utilización del nitrógeno por parte de la planta.



Planta de castaño regenerada *in vitro* a partir de un ápice caulinar que fue sometido a crioconservación (–196 ºC en nitrógeno líquido). El material original procede de un rodal de castaños seleccionados en Lalín, Pontevedra.

Los riesgos potenciales que entrañan las especies transformadas se encuentran todavía en período de evaluación. Con todo, los árboles de interés forestal no entran en la cadena trófica. Además, la posibilidad de transferencia genética a poblaciones naturales puede paliarse con la obtención de árboles estériles, al menos hasta que termine el período de evaluación, o bien con la transformación cloroplástica.

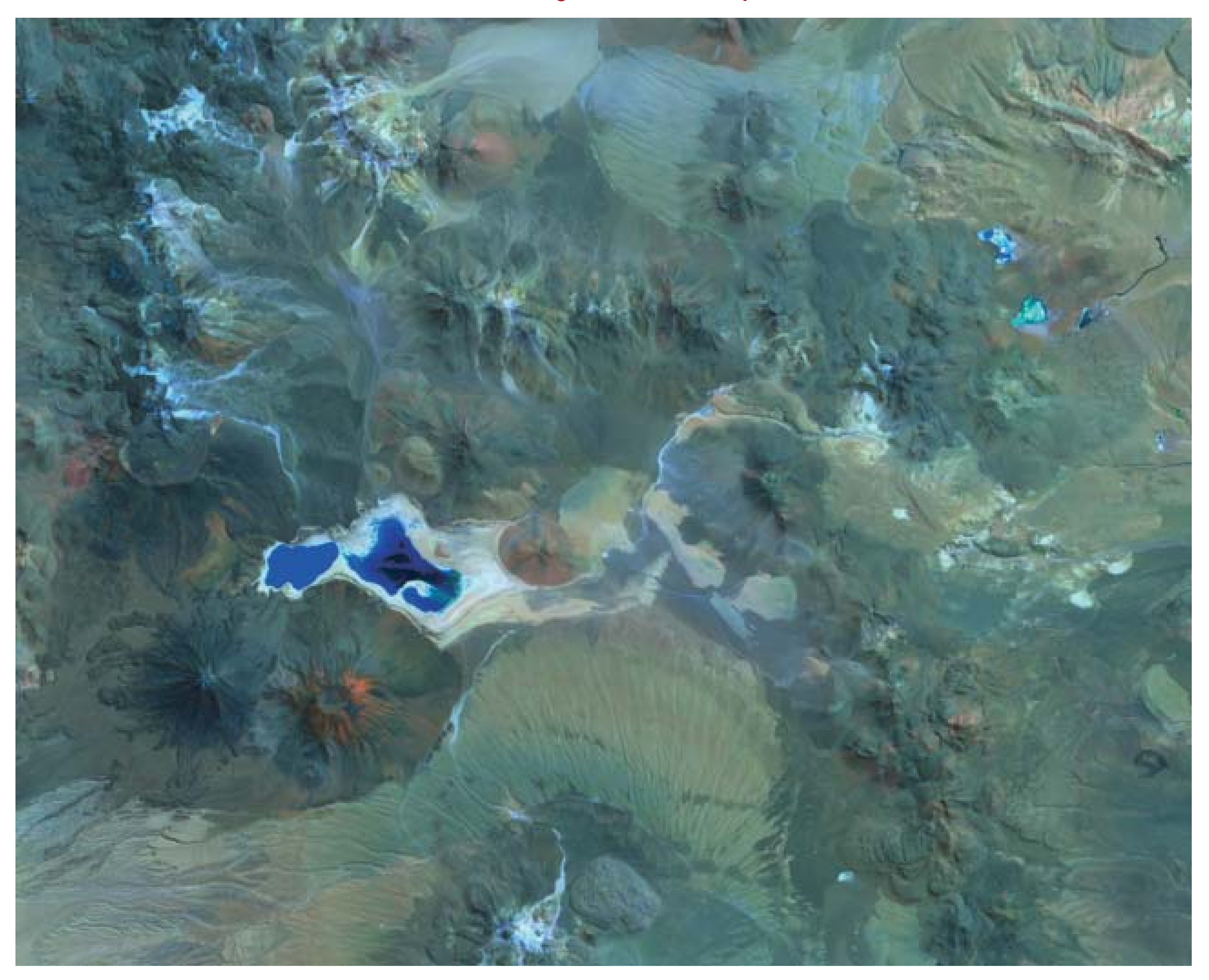
En el caso de las modificaciones que confieren resistencia a los herbicidas, aceleran el desarrollo de los árboles o atañen a la característica de las fibras y composición de la lignina, las consecuencias negativas probablemente sean mínimas. Mayor peligro puede presentar la propagación de genes que promueven protección contra patógenos naturales (por ejemplo, genes Bt).

Las expectativas creadas con el uso de la biotecnología en la producción forestal son elevadas, pero los logros hay que evaluarlos a largo plazo. No serán, por supuesto, equiparables a los conseguidos en especies agrícolas. Pero la necesidad de invertir a largo plazo, forzada por los ciclos de desarrollo de los árboles, no debiera frenar la investigación. Aunque los árboles transgénicos no se emplearan a gran escala en el futuro, la investigación y el desarrollo en biotecnología forestal debería continuar, pues permitiría suministrar una valiosa información sobre la acción y regulación génica, información que podría utilizarse en los programas de mejora tradicional.

ANTONIO BALLESTER
y ANA M. VIEITEZ
Instituto de Investigaciones
Agrobiológicas de Galicia, CSIC,
Santiago de Compostela

Emilio O Casamayor

La vida en el lago más alto del planeta



1. Las lagunas y el volcán Licancabur del desierto de Atacama, en una imagen de satélite.

El volcán Licancabur (6014 m) se encuentra en la frontera entre Bolivia y Chile. Encierra en su cráter el lago más alto y desconocido del mundo. Amén de sufrir los efectos térmicos y geológicos propios de una zona volcánica, este lago contiene bajas concentraciones de oxígeno, recibe una radiación ultravioleta extrema y soporta bajas presiones atmosféricas. Tan particulares características lo convierten en un modelo único en la Tierra para estudiar lo que pudieron ser los antiguos lagos marcianos. Pese a la hostilidad del ambiente, la vida microbiana abunda en estas aguas.

Observadas desde el espacio, las llanuras del desierto de Atacama dibujan un océano de rocas y arena salpicado de pequeñas manchas de agua. Sometidas a una fuerte evaporación, estas lagunas saladas son engullidas poco a poco por el desierto. La masa de agua del interior del cráter del volcán también está experimentando una intensa desecación. Ello obliga a los microorganismos que la habitan a soportar mayores dosis de radiación ultravioleta y a desarrollar mecanismos de adaptación para sobrevivir. Quizá llegue un momento en que estas condiciones extremas resulten demasiado hostiles para la vida. Tal vez así aconteció en Marte.

La expedición Licancabur se halla integrada por expertos de varios campos e instituciones. El interés de los investigadores del Consejo Superior de Investigaciones Científicas se centra en catalogar la biodiversidad microbiana que medra en este peculiar ambiente, así como determinar sus estrategias de adaptación al medio hostil. Otros se dedican a comprobar, sobre el terreno, la eficacia de los dispositivos técnicos que la NASA está preparando para las futuras expediciones tripuladas al Planeta Rojo.

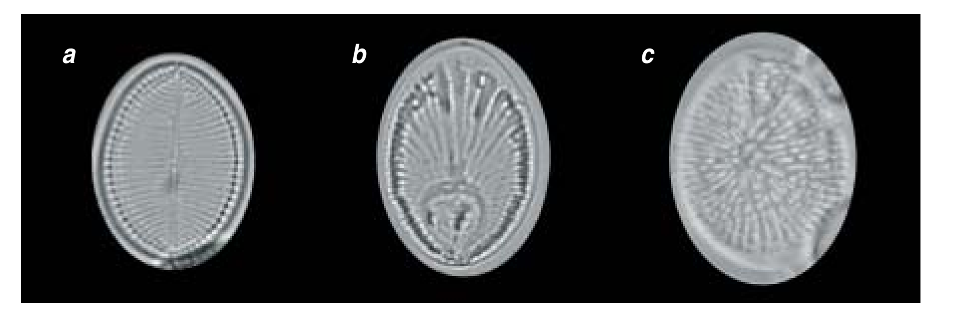


2. UNA MASA DE AGUA se mantiene, en el interior del cráter, en estado líquido a casi 6000 metros de altitud. Las condiciones para la vida son extremas, equiparables a las que pudieron darse en los antiguos lagos marcianos.

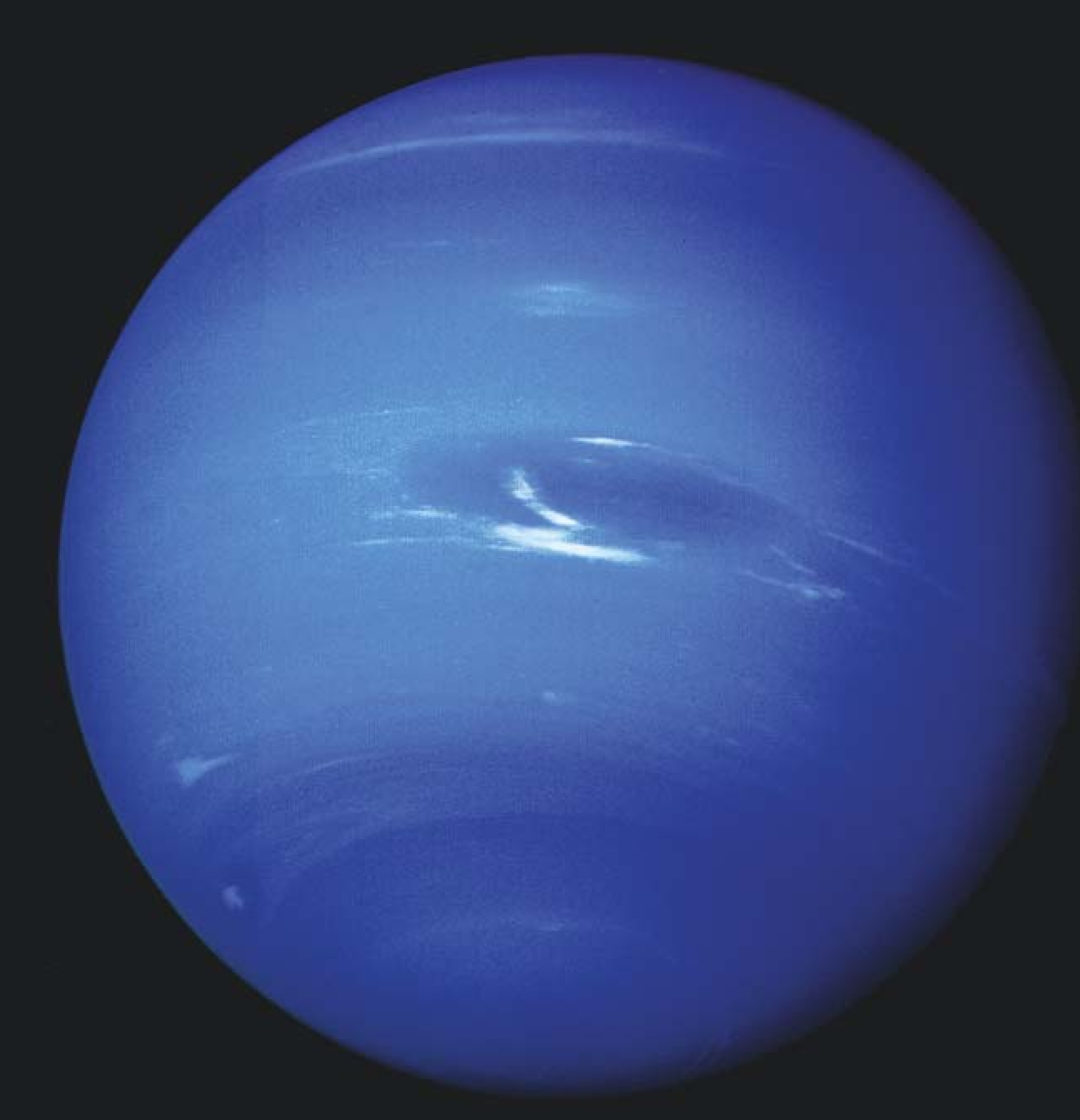
3. EL VOLCAN LICANCABUR se alza majestuoso sobre la planicie del desierto de Atacama, en el altiplano chileno. En su cima se halla el mejor modelo terrestre de lo que pudo ser la geología de Marte en épocas remotas.



4. MICROORGANISMOS en una muestra recogida sobre un filtro de 0,22 micras. Imagen obtenida mediante microscopía óptica y colorante.



5. VALVAS DE DIATOMEAS del género *Cocconeis*. Se observan alteraciones (*b* y *c*) respecto a la configuración normal (*a*). Imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (foto KT Kiss).



El descubrimiento de Neptuno

¿Se apropiaron los británicos de méritos que no les correspondían?

William Sheehan, Nicholas Kollerstrom y Craig B. Waff

"Esa estrella no figura en el mapa." Estas palabras, pronunciadas por el estudiante de astronomía Heinrich Louis d'Arrest bajo la cúpula del Observatorio de Berlín el 23 de septiembre de 1846, resuenan desde entonces en todas las instituciones astronómicas.

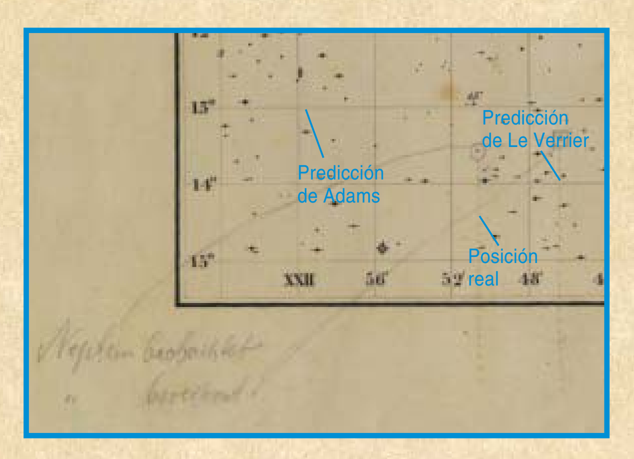
D'Arrest, ante un mapa celeste desplegado, ayudaba al astrónomo titular Johann Gottfried Galle a verificar una predicción extraordinaria del matemático francés Urbain Jean Joseph Le Verrier. Este había desarrollado la hipótesis de que Urano —el planeta más alejado del Sol, según se creía por entonces— se desviaba de su órbita debido a la atracción gravitatoria de otro planeta, desconocido hasta ese momento. Cinco días antes había escrito a Galle: "Puede comprobar, señor, que demuestro ... [que] las observaciones de Urano sólo tienen sentido si se introduce la acción de un nuevo planeta hasta ahora desconocido, y debe destacarse que en la eclíptica sólo hay una posición que pueda asignársele a ese planeta perturbador".

Antes de que hubiera pasado media hora de observación, Galle halló un pequeño disco azul situado a menos de un grado de la posición prevista. A la noche siguiente observó que el cuerpo se había movido un poco, signo inequívoco de que no se trataba de una estrella. Enseguida escribió a Le Verrier: "¡El planeta cuya existencia usted anticipó realmente existe!"

La investigación matemática y la detección telescópica del planeta, al que Le Verrier dio el nombre de Neptuno, es uno de los episodios más célebres de la historia de la astronomía. También es famosa la controversia que se generó cuando, poco después de que Galle anunciase el descubrimiento, se supo que un joven y poco conocido matemático inglés, John Couch Adams, tras plantearse el mismo problema, había deducido por su cuenta una posición muy parecida antes incluso que Le Verrier.

La reclamación de Adams fue recibida con escepticismo por los astrónomos franceses, aunque parecía contar con el aval inapelable de la documentación presentada por George Biddell Airy, Astrónomo Real Británico, en una reunión de la Real Sociedad Astronómica el 13 de noviembre de 1846. Airy confirmó que en el otoño de 1845 había recibido de Adams la predicción de una posición y que durante el verano siguiente había emprendido una búsqueda telescópica del planeta, aunque no se publicaron los resultados. Tal descripción de los acontecimientos consiguió el acuerdo unánime de que Adams y Le Verrier debían compartir por igual el mérito del descubrimiento.

Las relaciones posteriores de este episodio se inspiraron en la exposición de Airy. Con ella quedaron fijados los papeles de los protagonistas (Le Verrier, Adams, Airy y James Challis, el astrónomo de la Universidad de Cambridge que dirigió el rastreo telescópico británico). Adams era el héroe tímido y retraído a quien poco después exaltaría la revista de la Real Sociedad Astronómica como "el mayor de los astrónomos matemáticos británicos..., con la excepción de Newton". De Adams y Le Verrier se dijo que habían sido capaces de superar las rivalidades internacionales, hasta convertirse en amigos de por vida. A Challis se le tomó por un zángano que echó a perder la busca. Y Airy quedó como ejemplo del burócrata; de él, Isaac Asimov llegó a escribir, en 1976, que, "fatuo, envidioso y corto de miras, dirigió el Observatorio de Greenwich como un mezquino tirano tan obsesionado por los detalles, que se le escapaba siempre la visión de conjunto... Con alguien tan desagradable intentó Adams entrar en contacto".



1. EL TRIUNFO DE LA MECANICA CELESTE. Este mapa celeste sirvió de guía a Johann Galle y Heinrich Louis d'Arrest para descubrir el planeta Neptuno en la noche del 23 de septiembre de 1846. Las anotaciones (atribuidas a Galle) indican el lugar en que se encontró el planeta y la posición prevista por Urbain Jean Joseph Le Verrier. Galle no se había enterado de que John Couch Adams había predicho una posición en la misma región celeste.

Documentos robados

A lo largo del tiempo, algunos historiadores han ido poniendo en entredicho semejante guión oficial. Uno de los primeros, hace ya medio siglo, fue el astrónomo británico William M. Smart, que había heredado una colección de artículos científicos de Adams. A finales del decenio de 1980, Allan Chapman, de la Universidad de Oxford, y Robert W. Smith, entonces en la Universidad Johns Hopkins, hallaron otros documentos de interés para el caso. Y desde los años sesenta, Dennis Rawlins, un estudioso independiente radicado en Baltimore, no ha

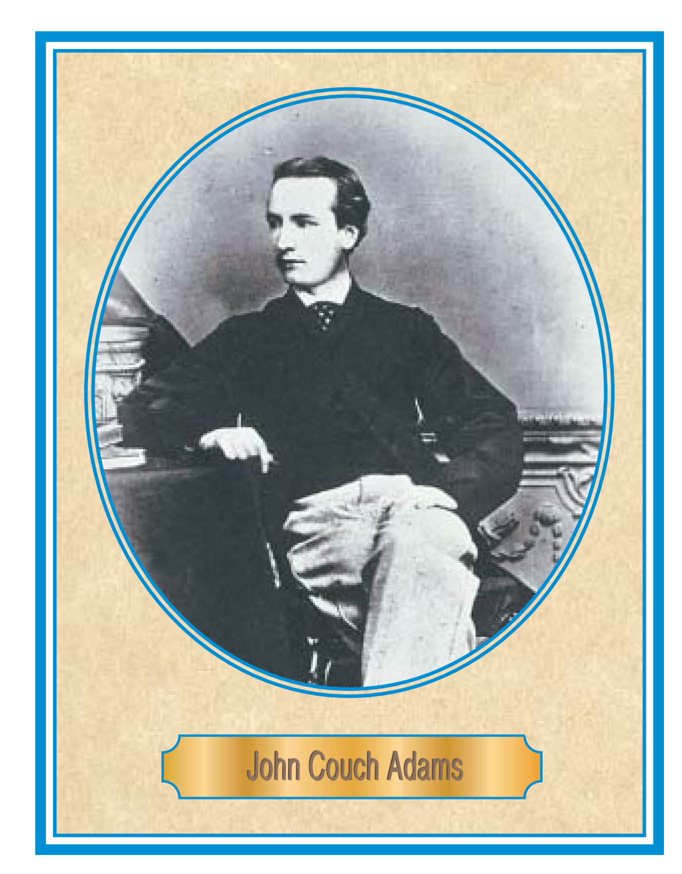
NASA/JPL (*Neptuno*); ARCHIVO DE LA BIBLIOTECA DEL INSTITUTO DE ASTROFISICA POTSDAM (*mapa*)

dejado de cuestionarlo todo: sostiene que los astrónomos británicos del siglo XIX falsificaron conscientemente la documentación o, al menos, la retocaron.

Todas estas dudas se habrían disipado si los historiadores hubiesen tenido ocasión de consultar los documentos citados por Airy. Sin embargo, desde los primeros años sesenta, cada vez que les solicitaban dicha documentación, los bibliotecarios del Real Observatorio de Greenwich respondían que no estaba disponible. Su paradero constituía un misterio casi tan llamativo como los avatares del descubrimiento de Neptuno. ¿Cómo era posible que se hubiera perdido la documentación de uno de los acontecimientos más importantes y gloriosos de la historia de la astronomía?

Rawlins y el personal de la biblioteca compartían la sospecha de que la documentación podía encontrarse en posesión del astrónomo Olin J. Eggen, que había ocupado el cargo de ayudante principal en el Real Observatorio a comienzos de la década de 1960. La había solicitado para escribir diversos artículos biográficos sobre Airy y Challis; era la última persona que la había consultado. Pero Eggen, que luego se trasladó a Australia y más tarde a Chile, negaba estar en posesión de esos papeles. Los bibliotecarios, temerosos de que, si efectivamente obraban en su poder, los destruyera para que no lo inculpasen, evitaron presionarle en exceso.

El misterio se prolongó hasta octubre de 1998, más de 30 años después de que se viese por última vez la documentación. Eggen había fallecido el 2 de octubre de ese año y los colegas que visitaron su despacho en el Instituto Chileno de Astronomía encontraron los documentos perdidos (junto a muchos libros valiosos procedentes de la biblioteca del Real Observatorio). Embalaron ese material (más de 100 kilogramos) en dos grandes cajas y lo devolvieron a la biblioteca de la Universidad de Cambridge, en la que se encuentran los archivos del Observatorio (el personal de la biblioteca hizo de inmediato copias de seguridad). Este hecho afortunado, junto al descubrimiento en diversos archivos de otros documentos pertinentes, nos ha permitido reconsiderar el descubrimiento de Neptuno bajo una nueva perspectiva.


John Couch Adams

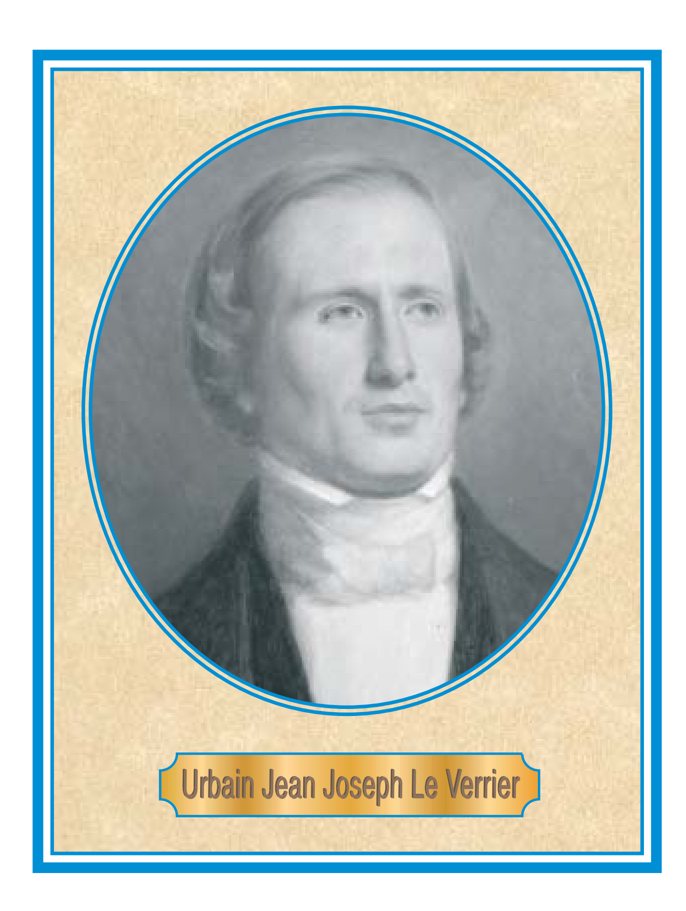
Resumen/Descubrimiento de Neptuno

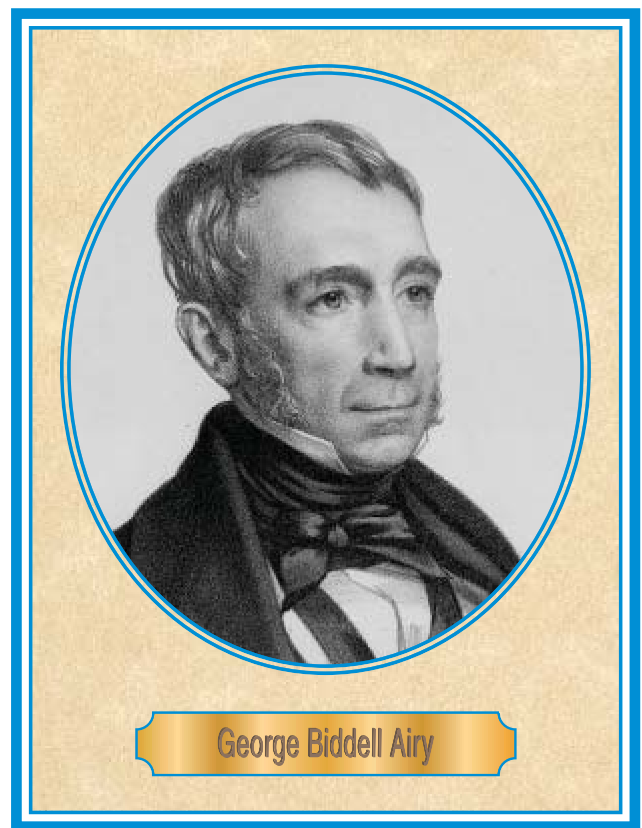
- A comienzos del siglo XIX, los astrónomos tuvieron que enfrentarse a un problema de repercusión astronómica: el planeta Urano se alejaba de su órbita. El misterio quedó resuelto en 1846, cuando los observadores, guiados por los teóricos, descubrieron el planeta Neptuno. Su gravedad explicaba la desviación de Urano.
- Los historiadores han atribuido el mérito, a partes iguales, a dos astrónomos teóricos: el francés Urbain Jean Joseph Le Verrier y el inglés John Couch Adams. Nunca se ha puesto en entredicho la contribución de Le Verrier. Hasta mediados del siglo XX tampoco hubo dudas acerca de la participación de Adams.
- Cuando los historiadores se propusieron revisar el papel desempeñado por Adams, desapareció de unos archivos británicos un mazo clave de documentos. Reaparecieron en 1998 en Chile. Los autores descubrieron otros papeles cruciales hace unos meses.
- Adams llevó a cabo algunos cálculos interesantes, pero no se le puede atribuir el descubrimiento. Esa es la historia.

Fuera de órbita

A simple vista pueden verse cinco planetas (Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno); se los conoce desde tiempos inmemoriales. El primer planeta descubierto con la ayuda de un telescopio fue Urano. En la noche del 13 de marzo de 1781, un organista y aficionado a la astronomía, William Herschel, alemán nacionalizado inglés, barría el cielo nocturno con su telescopio, un reflector de fabricación casera de 15 cm de abertura. Enseguida advirtió que el pequeño disco de color verde amarillento que aparecía en la constelación de Géminis era un intruso, tal vez un cometa. Sin embargo, las observaciones y los posteriores cálculos de otros establecieron que no se trataba de un cometa, ya que su órbita no era muy elíptica. Se trataba de un planeta con todos los requisitos: un cuerpo que describía una órbita estable, casi circular, alrededor del Sol, del que distaba más o menos el doble que Saturno.

Que nuestro sistema solar albergase un nuevo e insospechado mundo cautivó a los astrónomos. Examinaron los catálogos de estrellas derivados de observaciones anteriores y se dieron cuenta de que el planeta recién descubierto, llamado Urano por el astrónomo alemán Johann Elert Bode, había sido visto veinte veces antes de 1781, incluso una en 1690, pero siempre lo confundieron con una estrella. En 1821, el astrónomo francés Alexis Bouvard reunió todas las observaciones





y planteó un nuevo problema: aun teniendo en cuenta la influencia gravitatoria de los planetas gigantes, Júpiter y Saturno, los datos no cuadraban con las leyes newtonianas del movimiento y la gravitación. ¿Estaban equivocadas? ¿Impregnaba el espacio un medio resistente que frenaba el avance del planeta? ¿O tal vez afectaba a Urano algún otro mundo desconocido? Más o menos como el problema de la materia oscura, que tanto confunde a los astrónomos de hoy, a la manera del siglo XIX.

El gran astrónomo alemán Friedrich Wilhelm Bessel se dispuso a estudiar el asunto, pero murió antes de obtener resultado alguno. La primera investigación completa publicada fue la de Le Verrier. Apareció en el número del 1 de junio de 1846 de la revista de la Academia Francesa de Ciencias. Predijo que el primero de enero de 1847 aparecería un planeta más allá de Urano a una longitud media —tal y como se lo vería desde un punto hipotético situado por encima del sistema solar— de 325 grados (*véase la figura 2*). La información llegó a Inglaterra en los últimos días de junio. Airy recordó que a finales del otoño anterior había leído algo muy parecido en una hoja informal, manuscrita. La había depositado en el buzón de su casa un claustral del St. John's College de la Universidad de Cambridge.

Etéreo

El apellido del remitente era Adams. Su vida guardaba cierto paralelismo con la de Newton. Ambos habían crecido en la Inglaterra rural: Newton era hijo de un modesto agricultor de Lancashire, sin formación; Adams, de un aparcero de Cornualles. Ambos sintieron muy pronto interés por la regularidad de los fenómenos naturales y las matemáticas. Ambos clavaban testigos y hacían muescas en el alféizar de una ventana o en la pared para seguir el movimiento anual del Sol. Se parecían también por su carácter: serios, meticulosos, llenos de escrúpulos religiosos. Ante los demás se mostraban ensimismados, excéntricos, ausentes. A los dos hoy se les habría atribuido el síndrome de Asperger, una variante del autismo compatible con una inteligencia poderosa.

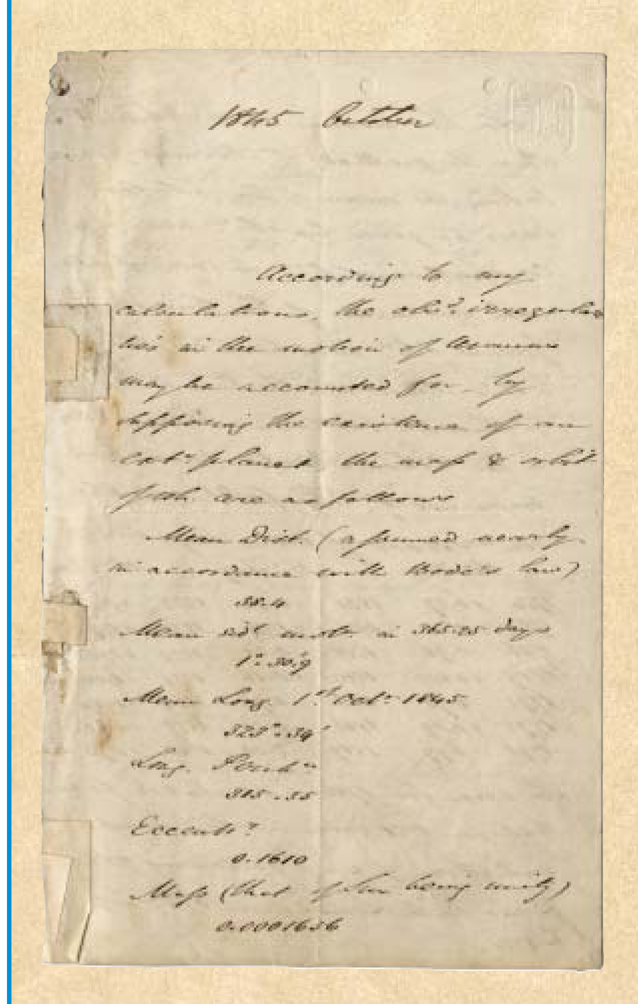
Adams nació el 5 de junio de 1819. A los diez años era tan brillante en matemáticas, que un amigo de la familia le consideró un "prodigio"; le dijo al padre: "Si fuese hijo mío, vendería hasta la camisa para que fuese a la universidad". Leía todo lo que caía en sus manos y versara sobre astronomía y matemáticas. Siendo todavía un adolescente, había calculado los momentos en que podrían verse en Cornualles las fases de un eclipse solar, tarea nada sencilla en aquellos tiempos en que no se disponía de calculadoras ni ordenadores. Cuenta la leyenda que observaba el cielo reclinado sobre una antigua cruz celta próxima al domicilio familiar, si bien su poca agudeza visual le impidió dedicarse a la observación astronómica. Una circunstancia fortuita, el descubrimiento de manganeso, de gran valor para la industria del acero, en las tierras cultivadas por su familia le llevó de la pobreza a la universidad de Cambridge.

Desde su ingreso, en 1839, quedaron manifiestas sus notables dotes. "Enseguida me desesperé", escribía su compañero A. S. Campbell, "porque había

Los documentos robados

La documentación sobre Neptuno perdida durante mucho tiempo se recuperó en 1998. Había sido robada de la biblioteca del Observatorio Real de Greenwich treinta años antes por el astrónomo Olin Eggen, no se sabe por qué. Apareció a su muerte entre sus pertenencias. Permite reconstruir mejor cómo amañaron los astrónomos victorianos la historia oficial del descubrimiento.





1845 October

According to my calculations, the obs^d irregularities in the motion of Uranus may be accounted for by supposing the existence of an ext^r planet, the mass & orbit of which are as follows

Mean Dist. (assumed nearly in accordance with Bode's law) 38.4

Mean sid^l motion in 365.25 days 1°.30'.9

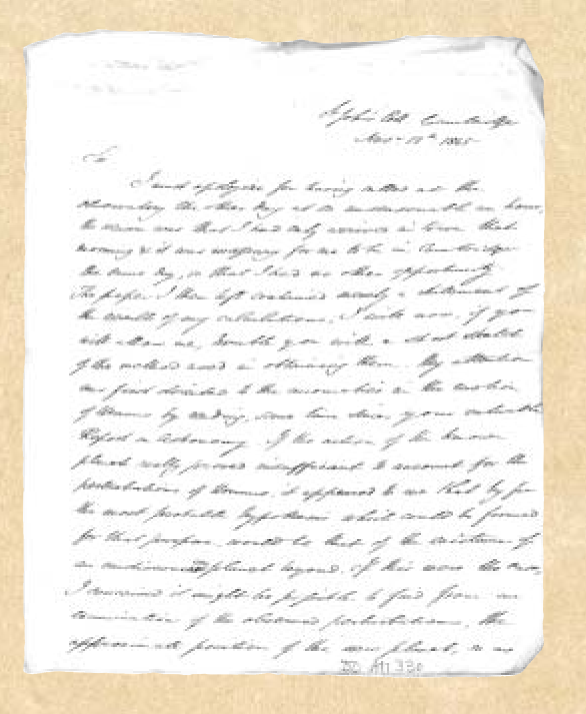
Mean Long. 1st Oct. 1845 323°.34'

Long. Perih^n 315°.55'

Eccent^y 0.1610

Mass (that of Sun being unity) 0.0001656

Uno de los documentos es esta nota, considerada durante mucho tiempo la prueba principal de que John Couch Adams predijo la existencia y la posición de Neptuno. La depositó en el buzón del astrónomo real George Bidell Airy en octubre de 1845. No deja lugar a dudas: contiene los resultados de un cálculo, pero no especifica ningún detalle.



Esta otra carta, dirigida a Airy, descubierta recientemente, procede de los archivos de Cornualles. Adams empezó a redactarla, pero no la terminó nunca. Aclara por qué no respondió a la petición de Airy de que le suministrase más información. Si lo hubiese hecho, los británicos habrían podido descubrir Neptuno bastante antes que los astrónomos francoalemanes. De la carta se desprende que Adams consideraba importante la petición de Airy, lo cual contradice sus declaraciones posteriores. Es evidente que otras cuestiones retenían su atención en esa época.

ido a Cambridge alimentando grandes esperanzas y el primero con el que me topé era infinitamente más capaz que yo". Adams ganó todos los premios de matemáticas que ofrecía la universidad. Y, sin embargo, parecía incorpóreo, etéreo. Otro alumno lo recordaba como "un sujeto chaparro, de paso ligero y embozado en un abrigo raído de color verde. Su patrona dijo de él que "a veces lo encontraba tendido en el sofá, sin libros ni papeles; pero no era raro que... cuando quería hablar con él, la única forma de atraer su atención consistiera en acercarse y tocarle en el hombro; llamarle por su nombre no servía de nada".

En julio de 1841, hacia la mitad de sus estudios universitarios, Adams encontró en una librería de Cambridge un "Informe sobre el progreso de la astronomía", escrito por Airy en 1832, donde se mencionaba la creciente desviación de Urano con respecto a la trayectoria prevista. Adams escribió en su diario:

> Me propuse... investigar lo antes posible, tras mi graduación, las irregularidades del movimiento de Urano que no han recibido todavía explicación, y averiguar si pueden atribuirse a la acción de un planeta desconocido situado más allá.

El pasatiempo de Adams

A lo largo de los cinco años siguientes Adams consideró el problema del movimiento de Urano como un pasatiempo. No parecía apremiarle; al fin y al cabo, llevaba esperando muchos años. Tras su graduación en 1843, obtuvo datos de Urano a través de Challis, astrónomo cuyo observatorio se hallaba a menos de dos kilómetros de St. John. Ocupado con las clases particulares que impartía, Adams realizó los cálculos mientras se encontraba de vacaciones en Cornualles. Los cálculos eran complicados, pero disfrutaba con ellos.

En primera aproximación, supuso que el planeta se encontraba a la distancia media predicha por la ley de Bode: 38 unidades astronómicas, dos veces la distancia de Urano. La ley de Bode es una relación empírica que, por razones desconocidas, proporcionaba las distancias orbitales de todos los planetas conocidos. Adams intentó reducir las discrepancias entre las posiciones de Urano observadas y las calculadas ajustando los diversos valores de los elementos orbitales del hipotético planeta; efectuó una serie de aproximaciones sucesivas, un procedimiento común en la teoría de perturbaciones, que con el tiempo se convertiría en un pilar fundamental de la física matemática.

A mediados de septiembre de 1845 informó a Challis de algunos resultados obtenidos durante el verano. Pero, ¿cómo lo hizo? Muchos historiadores han considerado que una nota de una sola página encontrada en los archivos de Adams zanja la cuestión. En ella se habla del "Nuevo Planeta" y contiene una anotación escrita por Challis: "Recibido en septiembre de 1845". Sin embargo, se trata de una inferencia harto endeble. De entrada, el uso de la expresión "Nuevo Planeta" no se generalizaría hasta bastante después. No hay vestigios de que Adams comunicase sus resultados a Challis por escrito; si lo hizo, el documento debe de haberse perdido. Habida cuenta de la naturaleza informal y deslabazada de ese intercambio científico, a nadie sorprende que Challis no se sintiese inducido a contrastar los resultados con la observación directa. Tenía sus dudas de que la teoría de perturbaciones permitiese predecir las posiciones de los planetas con la precisión suficiente. Más adelante escribiría: "Así como el esfuerzo era cierto, el éxito parecía de lo más incierto". Sin embargo, informó a Airy de que Adams había terminado unos cálculos.

A su regreso a Cambridge, acabadas las vacaciones en Cornualles, Adams decidió visitar a Airy. El 21 de octubre de 1845 se acercó, por dos veces, a la residencia de Airy en Greenwich Hill, a pesar de la práctica imposibilidad de entrevistarse sin cita previa con uno de los funcionarios más ocupados del país. No lograría su propósito. Aunque algunos relatos de este episodio culpan al mayordomo de no haber presentado la tarjeta de Adams, una carta escrita por la esposa de Airy, descubierta recientemente, le absuelve. Se recibió la tarjeta, pero Airy se hallaba ausente.

Adams dejó a Airy una nota manuscrita. Constituye el documento esencial sobre el que se basó la reivindicación de la autoría británica. En la nota figuran los elementos orbitales del hipotético planeta. La órbita se desviaba considerablemente de una circunferencia perfecta; la longitud media calculada para el 1 de octubre de 1845 era de 323 grados 34 minutos. El dato real para aquel día difería de ése en unos dos grados, más o menos la precisión de la posterior predicción de Le Verrier.

En la nota aparecían asimismo unas columnas con desviaciones del orden de los segundos de arco. Con ellas, Adams pretendía demostrar que su teoría explicaba el movimiento, hasta entonces anómalo, de Urano. Sin embargo, la nota no informaba acerca de dicha teoría y los cálculos correspondientes. Es más, antes de que un observador hubiese podido utilizar los datos para apuntar su telescopio, habría sido necesario transformar los elementos orbitales medios en posiciones celestes reales, para lo que tendría que haberse asignado una forma correcta a la órbita de Neptuno. En la versión de la nota que publicaría posteriormente Airy se suprimió una frase decisiva, puede que con la intención de ocultar esa carencia.

Un silencio inexplicable

Aunque muchos críticos han achacado a Airy no haber sabido percatarse de la importancia de esta nota trascendental, lo cierto es que respondió por carta a Adams:

> Le estoy muy agradecido por la nota con resultados que dejó en mi casa hace unos días, en la que aparecen las perturbaciones [diferencias en el valor de la longitud] de la posición de Urano producidas por un planeta con unos determinados elementos... Me gustaría mucho saber si esta supuesta perturbación [también] puede explicar el radio vector de Urano.

Airy se refería a un hecho que él mismo había determinado tras una larga serie de observaciones en el decenio de 1830: Urano, además de desviarse en longitud, se encontraba un poco más lejos del Sol de lo previsto. Si Adams hubiese respondido a la cuestión planteada por Airy, tal vez éste se hubiese decidido a buscar el planeta y los británicos habrían sido los únicos descubridores de Neptuno. Pero Adams no contestó. ¿Por qué?

Adams nunca dio una respuesta satisfactoria a esa cuestión crucial. Mucho tiempo después diría que había considerado "trivial" la pregunta de Airy y que no se había molestado en responder. Sin embargo, en un artículo publicado después del descubrimiento en el que resumía sus cálculos, admitió que el error en cuanto al radio era "considerable en ocasiones". En diciembre de 1846, el geólogo de Cambridge Adam Sedwigck le preguntó si su falta de comunicación reflejaba su irritación por no haber logrado reunirse con Airy, a lo que Adams respondió negativamente. Unas

veces lo achacó a su propia dejadez y otras, a que no le gustaba escribir.

En la colección de papeles de los Adams depositada en Cornualles, descubrimos el año pasado cierto documento que nos ha permitido saber que Adams empezó a redactar una carta a Airy que nunca llegó a enviar. La carta en cuestión está fechada el 13 de noviembre de 1845. En ella anuncia que tiene intención de describir sus métodos. También relata en pocas palabras la historia de sus primeros trabajos. Pero la epístola se interrumpe bruscamente al final de la segunda página. En otros dos trabajos de la misma época aparece la fórmula que describe la irregularidad del radio vector, aunque no va acompañada de ningún cálculo. Por consiguiente, parece que Adams valoró la importancia de la pregunta de Airy, si bien no logró darle respuesta.

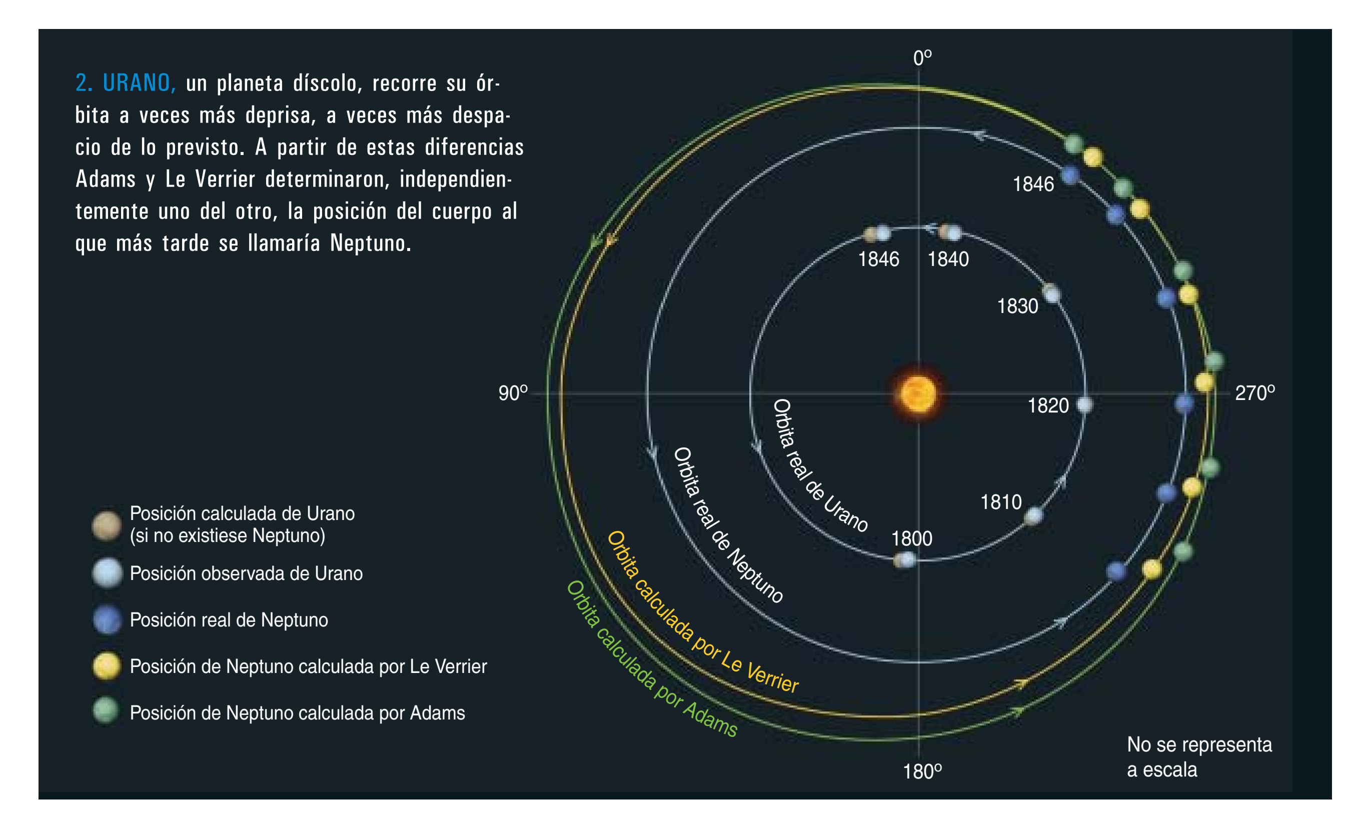
Ya descubierto Neptuno, Adams escribió a Airy que había considerado la posibilidad de buscar el hipotético planeta con los instrumentos de reducidas dimensiones existentes en el observatorio de la universidad. Pero tácitamente reconocía que, al no explicar su metodología a Challis ni a Airy, no pudo convencerles para que emprendieran una búsqueda inmediata del planeta: "No podía esperar que los astrónomos prácticos, absorbidos por tareas importantes, sintiesen tanta confianza en los resultados de mis investigaciones como yo".

La calma antes de la tormenta

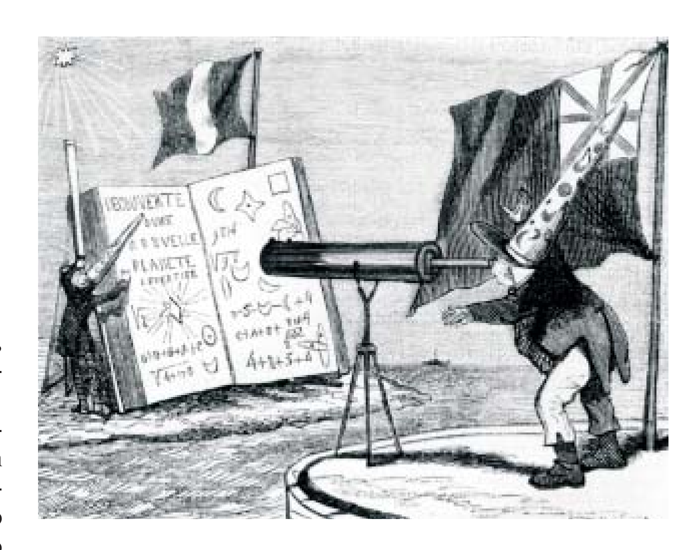
En la primera mitad de 1846, Adams se dedicó a un problema que parecía más urgente: el cálculo de las órbitas de los fragmentos de un cometa que se había escindido en dos. También se tenía que ocupar de la docencia, que, hoy como ayer, dejaba poco tiempo para la investigación. No se ha encontrado aún ningún documento que sugiera que las perturbaciones de Urano volviesen a interesarle hasta finales de junio de 1846, época en que llegó a Inglaterra el trabajo de Le Verrier.

Sólo entonces sugirió Airy a Challis que buscase el planeta. Adams aportó el cálculo de las posiciones celestes del hipotético planeta para finales del verano y principios del otoño. Rawlins señaló ya que los cálculos de Adams se basaron en la teoría circular de Le Verrier y no en su propia teoría. Challis inició sus observaciones el 29 de julio. Actuó con diligencia y exhaustivamente, según evidencian sus notas. Desconocedor de la existencia del mapa celeste de la Academia de Berlín que representaba la región en cuestión (el mapa que Galle y d'Arrest iban a utilizar a finales de septiembre), tuvo que elaborar su propio mapa. Anotó las posiciones de los cuerpos celestes que había observado dos veces; si alguno de ellos se movía, era un planeta potencial. Invirtió mucho tiempo en esta tarea: Airy le había pedido que estudiase una región muy amplia. Hacia septiembre, Challis había catalogado 3000 estrellas. Los días 4 y 12 de agosto había detectado el objeto que más tarde se llamaría Neptuno. Al no comparar inmediatamente las posiciones, dejó escapar la oportunidad de convertirse en su descubridor.

Mientras tanto, Adams revisaba sus propios cálculos, que resumió en una carta a Airy fechada el 2 de septiembre. Era consciente desde hacía tiempo de que había utilizado la ley de Bode de forma arbitraria y que la órbita no circular que había atribuido al hipotético planeta era poco verosímil. Durante las vacaciones de verano rehízo todos los cálculos; advirtió que una órbita circular, de menor radio, se ajustaba mejor a las observaciones. Pero entonces siguió jugando con los números y consideró la posibilidad de



2. URANO, un planeta díscolo, recorre su órbita a veces más deprisa, a veces más despacio de lo previsto. A partir de estas diferencias Adams y Le Verrier determinaron, independientemente uno del otro, la posición del cuerpo al que más tarde se llamaría Neptuno.



3. LAS DUDAS que se plantearon en Francia acerca de la legitimidad de la reclamación británica de la coautoría del descubrimiento de Neptuno se reflejan en esta viñeta. Apareció el 7 de noviembre de 1846 en *L'Illustration*. Al pie de la misma se lee: "El Sr. Adams descubre el nuevo planeta en el informe del Sr. Le Verrier." Las dudas remitieron al hacerse públicas pruebas documentales. Adams no plagió el trabajo de Le Verrier. Sin embargo, los británicos retocaron el alcance de su contribución.

ARCHIVOS CHARMET

una órbita de radio todavía menor, que, conjeturó, daría lugar a una longitud bastante distinta de la predicción original.

Según sabemos hoy, el nuevo enfoque de Adams situaba el planeta más cerca de una resonancia con Urano, en un lugar donde las influencias gravitatorias se acumularían y distorsionarían el planteamiento matemático del problema que había escogido. Para entonces, ya no importaba. Los nuevos cálculos llegaban demasiado tarde para condicionar la búsqueda del planeta.

Un aspecto de los cálculos de Adams, de su actitud en general, que los historiadores han mencionado pocas veces, es que siempre se refería al planeta como si fuera un constructo. Se trataba simplemente de una serie de elementos, una especie de truco de prestidigitador para que encajaran las columnas de números. Le Verrier, por el contrario, proporcionaba en su artículo una posición concreta del hipotético planeta y se refería a un objeto físico genuino que transitaba por los confines más fríos del sistema solar. En otro artículo publicado en agosto indicó que, a través del telescopio, el planeta podría reconocerse por su disco. Cuando esta sugerencia llegó a Inglaterra, Challis empezó a prestar mayor atención a la apariencia física de los objetos celestes que catalogaba. En sus notas del 29 de septiembre, escribía que "uno parece tener un disco". Días antes, el Observatorio de Berlín había detectado ese mismo objeto y confirmado su naturaleza planetaria. Había dejado de ser un mundo hipotético. "Dios de los Cielos, ¡qué grande es!", exclamó Galle.

Los británicos robaron Neptuno

Después de examinar los documentos originales, podemos concluir que los británicos coetáneos de Adams le otorgaron más mérito del que se merecía, sin menoscabo de los cálculos notables que realizó. Con Le Verrier debe reconocérsele su labor pionera en la aplicación de la teoría de perturbaciones al movimiento de los planetas. Posiblemente tuviese gran confianza en la precisión y la corrección de sus resultados, aunque siempre se tiende a sobrestimar el alcance de una predicción, una vez demostrada la realidad de un fenómeno.

En cualquier caso, Adams no logró transmitir de forma convincente sus resultados a sus colegas y al resto del mundo. Un descubrimiento no sólo consiste en emprender el primer análisis de un problema y llevar a cabo algunos cálculos interesantes, sino también en tener conciencia del descubrimiento y transmitirlo de forma eficaz a la comunidad científica. Todo descubrimiento tiene un lado público y un lado privado; Adams sólo completó la mitad de esa doble tarea. Por ironía de las cosas, los mismos rasgos del carácter (energía y resolución) que permitieron a Le Verrier llegar el primero, ante un Adams tímido e ingenuo, se volvieron en contra de aquél en los años posteriores al descubrimiento. Los científicos británicos cerraron filas detrás de Adams, mientras que Le Verrier fue tratado con desdén por sus colegas.

La historia aquí contada nos habla también del papel de la suerte en los descubrimientos. En cierto sentido, ni Adams ni Le Verrier predijeron realmente la posición de Neptuno. Ambos sobrestimaron bastante la distancia real del planeta; lograron dar con la longitud casi exacta gracias a un golpe de fortuna: en el momento de las observaciones, el planeta se hallaba en el tramo de la órbita óptimo para la observación en aquellas fechas. De ese tipo de coincidencias hay ejemplos abundantes en la historia de la ciencia. Un siglo más tarde, se produjo un fenómeno parecido cuando el descubrimiento de Plutón.

Ahora que las pasiones desatadas por las rivalidades internacionales de aquellos años ya no existen y que los historiadores han accedido a los documentos originales conservados, puede afirmarse que a Adams no se le puede atribuir el mismo mérito que a Le Verrier en el descubrimiento de Neptuno. Ha de recaer en exclusiva en quien predijo la posición del planeta y convenció a los astrónomos de que diesen con él. El autor de esa hazaña fue Le Verrier.

Los autores

William Sheehan, Nicholas Kollerstrom y Craig B. Waff, historiadores de la ciencia, han colaborado para reconstruir el proceso del descubrimiento de Neptuno.

Bibliografía complementaria

THE PLANET NEPTUNE: AN HISTORICAL SURVEY BEFORE VOYAGER. Patrick Moore. Praxis, 1996.

IN SEARCH OF PLANET VULCAN: THE GHOST IN NEWTON'S CLOCKWORK UNIVERSE. Richard Baum y William Sheehan. Plenum, 1997.

BRITHSH NEPTUNE-DISASTER FILE RECOVERED. Dennis Rawlins en *DIO*, vol. 9, n.º 1, págs. 3-25; junio de 1999.

El origen de la mano humana

El análisis estadístico de los restos de la mano de un hominino demuestra que las proporciones características de la mano humana no pudieron ser una adaptación ligada a la industria lítica

David M. Alba, Salvador Moyà Solà y Meike Köhler

Una de las principales críticas a las que tuvo que hacer frente Darwin tras la publicación de *El Origen de las Especies* sostenía que la selección natural sólo podía eliminar los caracteres inadecuados, pero no crear las complejas adaptaciones que observamos en la naturaleza. Según esta crítica los estadios primeros, en sí mismos incompletos, no podían conferir la ventaja adaptativa que proporciona la estructura acabada. En ediciones posteriores del libro, Darwin rechazó la objeción apelando al principio de cooptación.

De acuerdo con el principio de cambio funcional, como se conoce también el de cooptación, en sus estadios iniciales la estructura habría desempeñado una función distinta; ahora bien, tal función del pasado habría sido, tiempo después, "cooptada", vale decir, reclutada para cumplir la misión actual. Para esa desconexión entre el origen de una estructura y su función actual, los paleontólogos Stephen Jay Gould y Elisabeth Vrba acuñaron en 1982 el término exaptación. Debía aplicarse a aquellas estructuras cooptadas, es decir, aquellas que en su origen o no desarrollaban ninguna función o desarrollaban una función adaptativa diferente de la que, andando el tiempo, cumplirían. Había, pues, que distinguir entre adaptaciones genuinas, propias de las estructuras que evolucionaron mediante selección natural para llevar a cabo su función actual, y exaptaciones.

Adaptación y exaptación

No resulta fácil saber cuándo nos encontramos ante una adaptación y cuándo ante una exaptación. En paleontología no podemos observar de un modo directo la función de una estructura, sino que hemos de inferirla a partir de la forma. Si interpretamos todas las estructuras como adaptaciones, podremos deducir la función de las estructuras fósiles a partir de la función que desempeñan en los descendientes. Pero si hemos de separar, de acuerdo con el principio de cooptación, función actual y origen evolutivo, nos encontra-



DAVID M. ALBA, SALVADOR MOYA SOLA Y MEIKE KÖHLER

1. VISION PALMAR del metacarpiano del dedo pulgar de chimpancé (*izquierda*), *Australopithecus afarensis* (*centro*), hembra humanos y macho humano (*derecha*). La mayor robustez en el caso de los humanos sugiere que este carácter se halla vinculado a la fabricación y uso de útiles líticos.

mos con un problema importante: ¿cómo averiguar la función de una estructura en el registro fósil?

Para aceptar una hipótesis de adaptación en el registro fósil, señala George Lauder, se requiere, como mínimo, que exista una concordancia histórica entre el origen de la estructura y el inicio de una presión selectiva que favorezca la función en cuestión. En palabras de E. N. Arnold: "Queda descartada cualquier hipótesis de adaptación si aparece el carácter novedoso antes que el pertinente régimen selectivo". A menudo se confunde exaptación con adaptación, pese a la claridad del principio: si la aparición de la nueva forma y de la nueva función no coinciden, nos hallamos ante una exaptación.

Enunciadas tales premisas conceptuales, veamos su aplicación al origen de la mano humana, uno de nuestros objetos de estudio en el Instituto de Paleontología M. Crusafont de Sabadell. ¿Evolucionaron las proporciones de la mano humana en el sentido de una adaptación para la fabricación de herramientas? ¿O ya existían anteriormente para desarrollar una función distinta?

Dentro del orden de los Primates, los humanos modernos (*Homo sapiens*) presentan dos características distintivas principales, a saber, la locomoción bípeda y un grado elevado de encefalización. Ambas peculiaridades aparecieron en algún punto de la evolución humana después de que el linaje humano se separase del linaje de los grandes antropomorfos. El bipedismo se remonta como mínimo hasta nuestros ancestros australopitecos (género *Australopithecus*); la encefalización incrementada, a los primeros representantes del género *Homo*.

La aparición del bipedismo permitió que las extremidades anteriores, en particular las manos, quedaran liberadas de funciones locomotoras y se aplicaran exclusivamente a la manipulación. A su vez, el elevado grado de capacidad de procesar información, asociado a un gran tamaño del encéfalo en relación con la masa corporal, posibilitó, en el curso de la evolución humana, no sólo usar, sino también fabricar, útiles cada vez más complejos, hasta desembocar en las muy tecnificadas sociedades actuales. Pero ello no se habría logrado sin una morfología adecuada de la mano humana, que permitiese una manipulación eficiente durante el uso y la fabricación de instrumentos líticos.



2. PINZA DE PRECISION de tipo humano. Las yemas del pulgar y de otro dedo (normalmente, el índice) sostienen con firmeza y precisión el objeto en cuestión.

Pinzas de precisión

Entre las diversas características de la mano humana que facilitan la manipulación de útiles, destacan las proporciones; en particular, la gran longitud del pulgar con respecto a la longitud total de la mano. Tales proporciones son esenciales para realizar la "pinza de precisión de tipo humano". Los primates en general pueden llevar a cabo dos tipos de pinza: de precisión y de fuerza. Mediante la primera, sujetan los objetos entre el pulgar y uno o más del resto de dedos de la mano. Mediante la pinza de fuerza, el individuo sujeta los objetos entre la palma de la mano y el resto de dedos, con el pulgar sirviendo de mero soporte.

Humanos y grandes antropomorfos (chimpancés, bonobos, gorilas y orangutanes) realizan ambos tipos de operaciones. Sus manos utilizan, pues, pinzas de precisión y de fuerza en distintas proporciones. Sólo los humanos, sin embargo, realizan un tipo particular de pinza de precisión, la "pinza de precisión yema con yema". Aquí, el objeto en cuestión se sujeta con

Anatomía de la mano humana actual

Falange distal
Falange media
Falange proximal
Falanges
Huesos metacarpianos
Huesos carpianos
Cúbito
Radio

DAVID M. ALBA, SALVADOR MOYA SOLA Y MEIKE KÖHLER



3. MANOS PARCIALES, derecha e izquierda, de *Australopithecus afarensis* de la localidad A.L. 333/333w (*parte inferior de la ilustración*), comparadas con la mano de chimpancé (*arriba izquierda*) y la mano de humano moderno (*arriba derecha*). No se incluyen las falanges distales.

DAVID M. ALBA, SALVADOR MOYA SOLA Y MEIKE KÖHLER

fuerza entre las yemas del pulgar y de uno o más dedos de la mano (normalmente el índice). Este tipo de pinza, el más habitual entre los humanos, resulta vedado a los grandes antropomorfos por una razón biomecánica: la escasa longitud del pulgar con respecto al resto de los dedos.

Las manos de los grandes antropomorfos, largas en comparación con las de los humanos, resultan ser una adaptación a la locomoción arborícola. Sirven para suspenderse de las ramas y trepar por los troncos. Tanto el orangután como los simios antropomorfos africanos presentan este patrón de manos largas con un pulgar corto. Por tanto, con los elementos de juicio disponibles, podemos suponer que la mano corta y el pulgar largo de los humanos constituyen una característica derivada de nuestro linaje, evolucionada a partir de un antepasado con proporciones de la mano más simiescas, más primitivas.

Las proporciones de la mano de los simios antropomorfos no les impiden utilizar, e incluso fabricar, instrumentos, lo mismo en libertad que en cautividad; existen pruebas abundantes del uso de instrumentos por diversas especies de primates. En el caso particular de los chimpancés, se conoce incluso cierta variabilidad de un grupo a otro; además, son los únicos que no se limitan a aprovechar los objetos naturales encontrados, sino que los modifican. Mas, para esa fabricación de instrumentos toman tan sólo materiales orgánicos (ramas, por ejemplo), que no suelen dejar huella en el registro arqueológico.

Fabricación de útiles

La fabricación de instrumentos líticos y el uso de instrumentos secundarios (útiles para hacer útiles) corresponden de forma exclusiva a los humanos. El paleoantropólogo Randall L. Susman ha asociado las características morfológicas que permiten llevar a cabo una pinza de precisión de tipo humano con una mayor capacidad de manipular instrumentos. Más aún, erige esas características en "criterio de fabricación de instrumentos".

Si Susman tuviera razón, las proporciones de la mano humana deberían ser una adaptación para la fabricación de instrumentos líticos, cuando menos. La hipótesis entra, desde luego, dentro de lo posible. Pero el principio de cooptación nos advierte de un error potencial: igualar la función actual de una estructura anatómica con su origen evolutivo.

¿Son las proporciones de la mano humana una adaptación para la fabricación de instrumentos líticos? Para responder a esta pregunta, se requiere verificar el criterio de concordancia histórica, esto es, averi-

guar en qué momento evolucionaron las proporciones de la mano humana y en qué momento se originaron las presiones de selección impuestas por la fabricación de instrumentos líticos. Sólo el registro fósil puede suministrarnos tales datos.

Lo que dice el registro fósil

El registro fósil del comportamiento humano, o registro arqueológico, indica que las industrias líticas más antiguas documentadas datan de hace 2,5 millones de años (2,5 Ma). Por desgracia, a causa de la escasez de huesos de la mano de humanos fósiles, no se ha podido documentar todavía la transición evolutiva desde una mano simiesca hasta una mano humana. Por un lado, existen fósiles de la mano de *Ardipithecus ramidus*, uno de los miembros más antiguos reconocidos del linaje humano, hallado en Etiopía, pero aún no han sido publicados. Se cuenta también con una mano articulada, asociada a un esqueleto de *Australopithecus africanus*, recuperado en la cueva de Sterkfontein, aunque hasta la fecha sólo se han publicado informes preliminares. El espécimen manual más completo del registro fósil humano, el llamado O.H.7, procedente de la garganta de Olduvai, no presenta ni el metacarpiano ni la falange proximal del pulgar; no aporta, pues, suficiente información con que reconstruir las proporciones de la mano.

Quedan, por fin, los restos de la mano de *Australopithecus afarensis* (la especie del famoso esqueleto parcial de "Lucy"), desenterrados en el yacimiento etíope de A.L.333/333w. Entrañan un grave problema: los metacarpianos y falanges corresponden a varios individuos mezclados. Tal desorden ha dado pie a una doble interpretación de las afinidades morfológicas de la mano de *Australopithecus*. Para ciertos autores, incluido Susman, se trataría de una mano esencialmente simiesca y adaptada a la suspensión arborícola; además, al ser una mezcolanza de huesos de distintos individuos, no podrían determinarse las proporciones del pulgar. Para Mary W. Marzke y otros, la mano de *A. afarensis* mostraría algunos caracteres más cercanos a los humanos; el pulgar en particular sería más largo que en los grandes simios antropomorfos, sin alcanzar el tamaño de los humanos modernos y, por tanto, excesivamente corto para permitir la pinza de precisión yema con yema.

En cualquier caso, la mezcla de huesos constituía en sí misma un problema. Los partidarios de la hipótesis simiesca podían argumentar que las proporciones más humanas esgrimidas por los partidarios de la segunda hipótesis resultaban de la combinación aleatoria de los huesos.



4. MANO COMPUESTA de *Australopithecus afarensis*, confeccionada a partir de la mano izquierda y la imagen especular de algún hueso de la mano derecha reproducidas en la figura 3. No se incluyen las falanges distales.

Aleatorización

Los autores de este artículo resolvimos la objeción de la mezcla de huesos en un artículo reciente, aparecido en *Journal of Human Evolution*. Basamos nuestro estudio de las proporciones de la mano de *A. afarensis* en la reconstrucción de dos manos parciales (izquierda y derecha) atribuidas a un mismo individuo. Cuando los huesos de la mano derecha e izquierda se combinan, a la reconstrucción sólo le falta la falange media del dedo cuarto; ello nos permite comparar las proporciones manuales de *A. afarensis* con humanos modernos y grandes antropomorfos actuales.

El supuesto de que los huesos seleccionados pertenecen a un mismo individuo, y los descartados no, se fundamentó en la compatibilidad de tamaños y en la estrecha congruencia encontrada entre las facetas articulares. De ello podía extraerse una hipótesis verosímil de trabajo, pero no una demostración irrefutable. En efecto, la mayoría de los fósiles (además de los huesos de la mano hay otros restos óseos) no se encontraron en conexión anatómica; se hallaban dispersos por una ladera de pocos metros cuadrados. Hay representados restos de, al menos, tres individuos de tamaño grande y dos de tamaño pequeño.

Nuestra principal aportación consistió en haber demostrado estadísticamente (con una fiabilidad del 95 %) que las conclusiones obtenidas suponiendo que los huesos empleados en la reconstrucción pertenecían a un mismo individuo seguirían siendo ciertas, aun cuando estos huesos perteneciesen todos a individuos distintos. Esta demostración estadística, clave para dar suficiente robustez a nuestras conclusiones, se llevó a cabo mediante la aplicación de un proceso de aleatorización a las técnicas estadísticas estándar empleadas.

En esencia, se acometieron los análisis no sólo con la mano compuesta de *A. afarensis*, sino también con una serie de manos "quiméricas" de humanos y grandes antro-

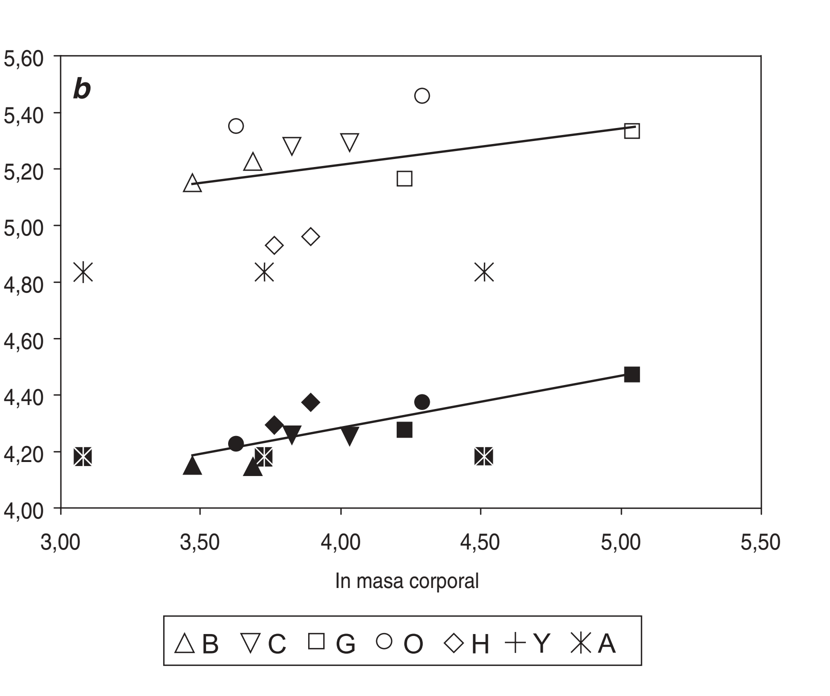
pomorfos actuales. Las quimeras se generaron de una forma aleatoria, mediante la mezcla de huesos procedentes de muchos individuos distintos. A través de ese método pudo calcularse la probabilidad de obtener erróneamente las proporciones de *A. afarensis* al mezclar aleatoriamente huesos correspondientes a individuos distintos. Cuando esta probabilidad no llegó al 5 %, quedó estadísticamente descartada la posibilidad de que los resultados obtenidos se debieran al azar.

Se comparó la mano de *A. afarensis* con manos de hominoideos actuales (humanos, chimpancés, bonobos, gorilas y orangutanes). En ese cotejo se tuvieron en cuenta la longitud relativa del pulgar y las proporciones globales de la mano. En el proceso de comparación se emplearon residuos alométricos, que permiten calcular la desviación de un individuo con respecto a la tendencia general de la muestra en cuanto al tamaño corporal; se sometieron los datos a un análisis de la varianza y análisis multivariante canónico, también llamado análisis discriminante.

En lo concerniente a las proporciones globales de la mano, *A. afarensis* se situó más cerca de los humanos que de los simios antropomorfos, aunque no sin diferencias estadísticamente significativas con los humanos actuales, una discrepancia explicable al tratarse de géneros distintos. El análisis de aleatorización confirmó tales resultados. Mostró, en particular, que, si se tiene en cuenta el grado de similitud con los humanos actuales, puede excluirse que las proporciones de tipo humano de la mano de *A. afarensis* se deban a la mezcla de huesos procedentes de distintos individuos. En lo concerniente al tamaño relativo del pulgar, *A. afarensis* también se aproximaba bastante a los humanos con un pulgar muy alargado, en comparación con los simios antropomorfos. También lo confirmó el procedimiento de aleatorización.

Atendiendo a la masa corporal, el largo pulgar de los humanos no resulta tanto de un alargamiento en términos relativos cuanto de un acortamiento del resto de la mano; idéntica explicación cabe ofrecer del pulgar de *A. afarensis*. Tales afirmaciones han de tomarse con cautela, dada la falta de conocimientos seguros sobre el tamaño corporal real de los fósiles; con todo, el análisis de aleatorización revela que sí podemos llegar, al menos, a conclusiones firmes respecto el acortamiento de la mano.

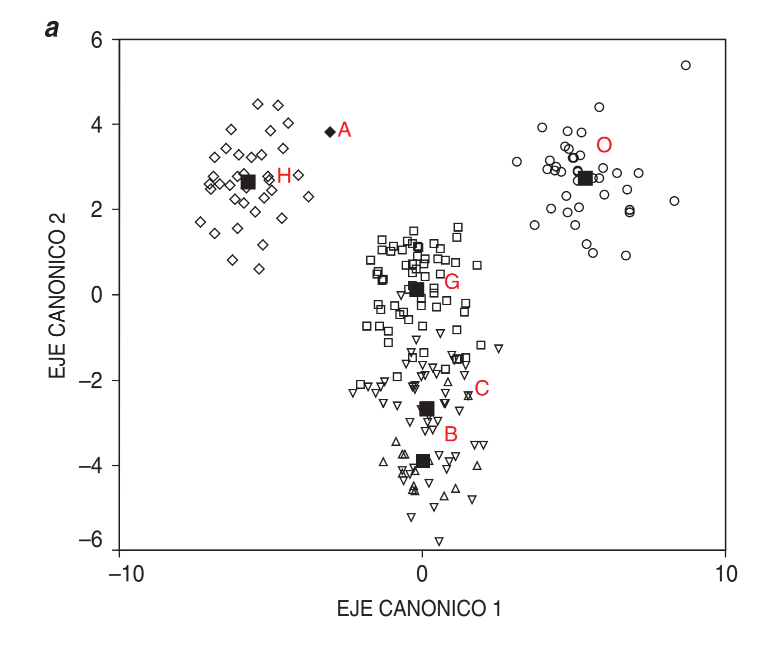
El hecho de que *A. afarensis* preceda en alrededor de un millón de años los primeros restos arqueológicos de industria lítica, fechados hace 2,5 Ma, nos permite refutar la hipótesis de Susman. Según éste, las proporciones humanas de la mano evolucionaron en origen como una

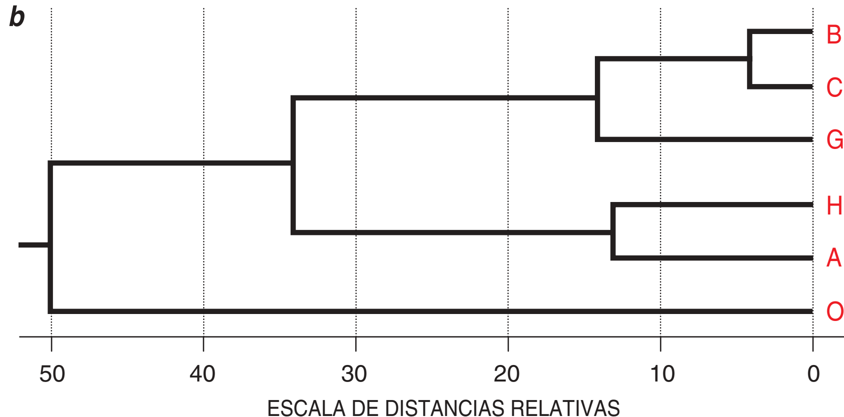


5. GRAFICOS ALOMETRICOS en los que se ponen en relación distintas medidas de la mano (*arriba*) y de la mano y el cuerpo (*abajo*). Así, en *a*, se ilustra la relación alométrica entre la longitud del pulgar y la longitud de la mano. En *b*, la relación entre la longitud del pulgar (símbolos sólidos) y de la mano (símbolos abiertos) respecto de la masa corporal. Las abreviaturas designan lo siguiente: ln, logaritmo natural; B, bonobo; C, chimpancé; G, gorila; O, orangután; Y, gibón; A, *Australopithecus afarensis*. Estos gráficos muestran que *A. afarensis* tenía un pulgar largo en relación con la mano (*a*); lo mismo que en los humanos actuales, ello se debía a un acortamiento de la mano y no a un alargamiento del pulgar (*b*).

DAVID M. ALBA, SALVADOR MOYA SOLA Y MEIKE KÖHLER

6. LAS TECNICAS ESTADISTICAS multivariantes establecen medidas del grado de semejanza de las manos de diferentes primates. El análisis discriminante realizado con los residuos alométricos relativos a la longitud de la mano arroja, como puede observarse en *a*, que *A. afarensis* se sitúa más próximo al "centroide" de los humanos modernos que al de los grandes antropomorfos. Queda fuera, sin embargo, de la variabilidad actual. (Los ejes canónicos son variables obtenidas a partir de las originales por medio de una transformación algebraica que permite establecer comparaciones entre grupos.) Otra manera de representar este análisis mediante gráficos —de *agregación*, con las "distancias de Mahalanobis" al cuadrado resultante del análisis discriminante— arroja también, como se representa en *b*, que *A. afarensis* se agrupa con los humanos modernos. Las abreviaturas designan lo siguiente: ln, logaritmo natural; B, bonobo; C, chimpancé; G, gorila; O, orangután; A, *Australopithecus afarensis*; H, humano moderno.





adaptación al uso y la fabricación de instrumentos líticos.

En efecto, queda patente que no se cumple el criterio de concordancia histórica entre el origen del carácter (las proporciones de la mano humana) y el comienzo de la presión selectiva pertinente (la fabricación de instrumentos líticos). Ello no excluye que se seleccionaran otras características de la mano humana para cumplir dicha función. Ahora bien, en lo concerniente a las proporciones de la mano, la fabricación de instrumentos líticos habría favorecido como máximo pequeños reajustes de las proporciones en cuestión.

Con otras palabras, las proporciones peculiares de la mano humana constituirían una adquisición anterior a la fabricación de útiles de piedra, adquisición que habría sido cooptada luego para llevar a cabo la nueva función. Con respecto a la fabricación de instrumentos líticos, las proporciones de la mano humana no serían una adaptación, sino una exaptación.

Origen de las proporciones de la mano humana

Una vez descartada la fabricación de instrumentos líticos, falta por resolver el origen de las proporciones humanas de la mano. De acuerdo con cierta hipótesis, que no puede comprobarse en el registro arqueológico, debería atribuirse a las presiones de selección impuestas por tipos de manipulación más complejos que los observados entre primates no humanos actuales. Razona la hipótesis que los homininos primitivos —los antecesores inmediatos de los humanos— habrían mostrado comportamientos instrumentales más complejos que los actuales chimpancés en libertad, incluyendo el uso y tal vez fabricación de útiles con materiales orgánicos.

Esa argumentación introduce un escenario posible, aunque no necesario. Atendamos a los primates no humanos actuales. Las manos les sirven para un amplio abanico de diversas funciones locomotoras y manipuladoras. Desde nuestra perspectiva antropocéntrica se nos hace a veces difícil entender que, en los precursores del linaje humano, la manipulación pudiera estar desvinculada de la fabricación de instrumentos. No obstante, todos los primates utilizan sus manos para tareas muy dispares, desde el acicalamiento hasta la recolección y el procesado de alimentos. Esas operaciones, sin relación con las herramientas, requieren, sin embargo, movimientos complejos.

Si se quiere evitar caer en un razonamiento circular, hay que abordar el origen de la mano humana en un marco que trascienda la vinculación de la misma con el manejo de útiles. En ese nuevo enfoque, deberían considerarse otras actividades llevadas a cabo por los primates en contextos no locomotores y que implican una manipulación compleja.

DAVID M. ALBA, SALVADOR MOYA SOLA Y MEIKE KÖHLER





7. MANOS de los primates antropomorfos fósiles *Dryopithecus laeitanus* (D) y *Oreopithecus bambolii* (O, doblemente representado). *Oreopithecus* presenta unas proporciones más cercanas a las humanas, aunque evolucionadas de forma independiente a partir de un ancestro con proporciones simiescas parecido a *Dryopithecus*. (No se incluyen las falanges distales.)

Aunque los biólogos se empeñen en analizar por separado la evolución de cada carácter, no debe olvidarse que los organismos presentan un alto nivel de integración. Merced a ello, una misma estructura anatómica desempeña a menudo más de una función; en razón de ello también, presiones selectivas de distinta índole actúan a la vez sobre la misma estructura anatómica. Lo observamos en las manos: aunque manipulación y locomoción no sean funciones excluyentes, acostumbran implicar presiones selectivas distintas, si no opuestas.

Las presiones selectivas de tipo locomotor ejercen, en general, una influencia más determinante y se reflejan directamente en la morfología de la mano. Las adaptaciones asociadas a la manipulación vienen condicionadas por las restricciones biomecánicas impuestas por la locomoción; con otras palabras: la locomoción podría impedir la adquisición de proporciones óptimas para una manipulación más eficiente. Los primates tienen las manos adecuadas para su tipo de locomoción. Dada la primacía de esa función, acometen como pueden la otra función, la de manipulación.

En los monos cuadrúpedos, las proporciones de la mano son en general más humanas (y por lo tanto, más eficientes para la manipulación), pues el cuadrupedismo terrestre favorece unas manos cortas. Pero en los gibones y orangutanes, con comportamientos locomotores arbóreos de tipo suspensor y trepador, se favorece una mano larga, menos adecuada para la manipulación; lo mismo se aplica a los antropomorfos africanos, que presentan un característico "andar de nudillos de tipo cuadrúpedo".

Sólo la adquisición de un bipedismo terrestre habitual, como encontramos en los humanos modernos, libera las manos de las fatigas locomotoras; quedan exclusivamente expuestas a la presión de selección relacionada con la función manipuladora.

Nuestra hipótesis

Desde los tiempos de Darwin viene admitiéndose una relación entre el bipedismo y la aparición de las aptitudes manipuladoras humanas. Nosotros proponemos la hipótesis de que las proporciones de la mano humana, incluida una longitud notable del pulgar, podrían haberse originado de las mismas presiones de selección que se pueden encontrar entre los primates no humanos actuales, una vez que las manos quedaron liberadas de demandas locomotoras al adoptar la locomoción bípeda.

La hipótesis se revela congruente con los datos anatómicos recabados de *A. afarensis*. Además de proporciones manuales de tipo humano, este australopiteco muestra ya muchas adaptaciones a un bipedismo habitual. Algunas de tales adaptaciones reflejan una menor eficacia para trepar a los árboles. Nuestra hipótesis concuerda también con otro aspecto de interés en *A. afarensis*: el incremento relativo de la longitud del pulgar no se obtuvo alargando el pulgar, sino reduciendo la longitud de la mano, que es lo que cabría esperar de una mano no sometida a una intensa presión de selección de tipo locomotor.

A propósito del tipo de cuadrupedismo terrestre en los antropomorfos africanos, podría aducirse que se privilegió un andar de nudillos frente al bipedismo o el cuadrupedismo digitígrado por una razón de peso: para conservar una mano larga, exigida en el mantenimiento de com-

DAVID M. ALBA, SALVADOR MOYA SOLA Y MEIKE KÖHLER

portamientos arborícolas ancestrales, pero poco adecuada para una manipulación eficiente.

Muchas de las características bípedas de *A. afarensis* implican ya un decremento en la eficiencia de la locomoción arbórea. Ello se hace evidente en los brazos, que tienen escasa incidencia en la mecánica del bipedismo, pero desempeñan una función primordial en la locomoción arbórea.

Nuestra explicación encaja también con el descubrimiento de que *Oreopithecus bambolii*, un simio antropomorfo bípedo, que evolucionó en condiciones de insularidad en el Mioceno superior de Italia, tenía un pulgar de proporciones humanas. Una vez más, la liberación de los requerimientos locomotores facilita la aparición de unas proporciones manuales de tipo humano como resultado de presiones de selección relacionadas con la manipulación, pero desligadas de la fabricación de instrumentos.

Los autores

David M. Alba, Salvador Moyà Solà y **Meike Köhler** constituyen el grupo de paleoprimatología del Instituto de Paleontología M. Crusafont de Sabadell. Alba está terminando su tesis doctoral sobre paleobiología de primates. Entre los hallazgos de Moyà y Köhler destacan los relativos al bóvido *Myotragus* y los grandes antropomorfos *Oreopithecus bambolii* y *Dryopithecus laietanus*. Recientemente, han dirigido en Can Vila las excavaciones que han proporcionado el nuevo primate antropomorfo *Pierolapithecus*.

Bibliografía complementaria

EVIDENCE OF HOMINID-LIKE PRECISION GRIP CAPABILITY IN THE HAND OF THE MIOCENE APE *OREOPITHECUS*. S. Moyà-Solà, M. Köhler y L. Rook en *Proceedings of the National Academie of Sciences*, vol. 96, págs. 313-317; 1999.

THE STRUCTURE OF EVOLUTIONARY THEORY. S. J. Gould. The Belknap Press of Harvard University Press; Cambridge, 2002.

MORPHOLOGICAL AFFINITIES OF THE *AUSTRALOPITHECUS AFARENSIS* HAND ON THE BASIS OF MANUAL PROPORTIONS AND RELATIVE THUMB LENGTH. D. Alba, S. Moyà Solà, M. Köhler en *Journal of Human Evolution*, vol. 44, págs. 225-254; 2003.



LOS VIRUS EXISTEN en la frontera que separa la vida de lo inanimado.

¿Tienen vida los virus?

Pese a poner en cuestión nuestro concepto de "ser vivo", los virus constituyen piezas fundamentales del entramado de la vida

Luis P. Villarreal

A lo largo de los ciento y pico años transcurridos desde su descubrimiento, y en repetidas ocasiones, los expertos han cambiado de opinión acerca de la identidad de los virus. Considerados primero venenos, luego formas de vida y más tarde sustancias bioquímicas, los virus ocupan hoy, en el pensamiento biológico, una zona gris entre lo vivo y lo inerte: incapaces de autorreplicarse, lo consiguen, sin embargo, en el interior de una célula viva. Además, condicionan de una forma determinante el comportamiento de tal huésped.

La inclusión de los virus en el mundo inerte, durante buena parte de la era moderna de la biología, trajo consigo una consecuencia negativa: se prescindió de ellos en el estudio de la evolución. Para nuestra fortuna, la ciencia comienza a valorar papel decisivo de los virus en la historia de la vida.

De formas vivas a contenedores de biomoléculas

No es extraño que la clasificación de los virus entrañe tamaña dificultad. Según la lente que usemos para observarlos, parecen una cosa u otra. El interés por los virus surgió de su relación con las enfermedades; la palabra "virus" proviene de la misma raíz que el término latino para designar "veneno". A finales del siglo XIX, los investigadores se percataron de que la rabia y la fiebre aftosa, entre otras afecciones, eran causadas por partículas que se comportaban como las bacterias, aunque presentaban un tamaño mucho menor. Dado que se trataba claramente de una entidad biológica y que se propagaba a otras víctimas causando en éstas efectos evidentes, se pensó que los virus constituían la más simple de todas las formas vivas portadoras de genes.

Fueron degradados a la categoría de compuestos químicos inertes en 1935, cuando Wendell M. Stanley y su grupo, en la institución que hoy se conoce como Universidad Rockefeller de Nueva York, lograron cristalizar el virus del mosaico del tabaco. El primero. Observaron que constaba de un paquete de biomoléculas complejas, aunque carecía de sistemas esenciales para las funciones metabólicas, la actividad química de la vida. Por este trabajo, Stanley compartió el premio Nobel de 1946 de química (no de fisiología o medicina).

Investigaciones posteriores del propio Stanley y otros establecieron que los virus consistían en ácidos nucleicos (ADN o ARN) encerrados dentro de una envoltura proteica que podía albergar también proteínas víricas implicadas en la infección. De acuerdo con esta descripción, un virus guarda semejanza más estrecha con un conjunto de moléculas que con un organismo. Sin embargo, cuando un virus penetra en una célula (su huésped, a partir de entonces), no permanece inactivo. Se despoja de su envoltura, libera sus genes y obliga a la célula huésped a poner al servicio del virus los mecanismos de replicación: la célula replica el ADN, o ARN, del intruso y, siguiendo las instrucciones del ácido nucleico del virus, sintetiza más proteína vírica. Los elementos víricos emergentes se ensamblan, armando nuevas partículas víricas, que terminarán quizá por infectar otras células.

BRYAN CHRISTIE DESIGN

Este comportamiento indujo a pensar que los virus moraban en la frontera entre la vida y la química. En un lenguaje metafórico, Marc H. V. van Regenmortel, de la Universidad de Estrasburgo, y Brian W. J. Mahy, del Centro de Control y Prevención de las Enfermedades estadounidense, consideran que los virus, al depender de la célula huésped, "viven de prestado". Importa subrayar que, aunque durante largo tiempo apostaron por la tesis que considera los virus meras bolsas de moléculas, los biólogos aprovecharon la actividad vírica en la célula huésped para establecer el mecanismo de codificación de las proteínas por ácidos nucleicos. Por contar toda la verdad, la información que sustenta la biología molecular moderna se obtuvo mediante la experimentación con virus.

Los biólogos moleculares procedieron a cristalizar la mayoría de los componentes esenciales de la célula (ribosomas, mitocondrias, membranas, ADN y proteínas entre otros), entendidos ahora como integrantes del engranaje químico o material que esa maquinaria usa o produce. Ocupados en desentrañar la complejidad de las estructuras químicas responsables de los procesos de la vida, a los biólogos moleculares no les ha quedado tiempo para meditar sobre si los virus poseen vida. Para ellos, tal tipo de reflexión ofrece idéntico interés que el de darles vueltas a la cuestión de si los constituyentes subcelulares individuales viven por sí mismos. Pero con esta perspectiva miope sólo aciertan a ver los virus como agentes que se hacen con el mando celular o infligen enfermedades. Cuestiones de mayor calado, así la contribución de los virus a la historia de la vida sobre la Tierra, permanecen sin respuesta e incluso sin plantearse.

El significado de las palabras


VIH

"'Vida' y 'vivo' son palabras que la ciencia ha tomado prestadas del lenguaje común. El préstamo ha resultado satisfactorio hasta fecha reciente, puesto que el experto —lo mismo que el iletrado— no sabía, ni se preocupaba por averiguar, el significado exacto de esos términos. Pero ahora se están descubriendo y estudiando sistemas que no pueden considerarse ni vivos a ciencia cierta ni muertos sin duda alguna; resulta, pues, necesario definir estas palabras o sustituirlas por otras de nuevo cuño."

—Norman Pirie, virólogo británico, c. 1934

"Piensas que la vida no es más que no estar muerto."

—George Bernard Shaw, Santa Juana, 1923

Ser o no ser

La cuestión, en apariencia sencilla, de si los virus poseen o no vida o no remite a otra cuestión más fundamental: ¿Qué es la "vida"? Aunque carecemos de una definición incontrovertida, se está de acuerdo en que la vida incluye otras notas características, amén de la capacidad de replicación. Por ejemplo, un ser vivo se encuentra en un estadio comprendido entre el nacimiento y la muerte; se supone también que requiere a cierta autonomía bioquímica para producir las moléculas y la energía necesarias para mantenerse. Este nivel de autonomía resulta básico en la mayoría de las definiciones de vida.

Ahora bien, puede decirse que los virus parasitan todos los aspectos biomoleculares de la vida. Dependen de la célula huésped para conseguir las materias primas y la energía requeridas en la síntesis de ácidos nucleicos, la síntesis, el procesamiento y el transporte de proteínas, y en todas las demás actividades bioquímicas relacionadas con la multiplicación y propagación víricas. Uno podría entonces concluir que, aun cuando esos procesos ocurren bajo la dirección del virus, éste sólo puede considerarse un parásito inerte de sistemas metabólicos vivos. Pero entre lo que es vivo y lo que no lo es, existe un amplio abanico de posibilidades.

Una roca, por ejemplo, no posee vida; tampoco, un saco metabólicamente activo, desprovisto de material genético y del potencial para propagarse. Una bacteria, sin embargo, posee vida. Pese a su naturaleza unicelular, genera la energía y las moléculas necesarias para automantenerse; además, se reproduce. ¿Qué decir de una semilla? Tal vez no pudiera considerarse viva, pero encierra el potencial para la vida y puede ser destruida. En este sentido, los virus guardan mayor semejanza con las semillas que con las células. Tienen un potencial, éste puede extinguirse y no alcanzan el estado de mayor autonomía propio de la vida.

La vida también puede entenderse como una propiedad emergente a partir de un conjunto de elementos inertes. La vida y la conciencia constituyen ejemplos de sistemas complejos emergentes. Ambos requieren un nivel crítico de complejidad o interacción para alcanzar sus respectivos estados. Una neurona por sí sola, o incluso en una red de nervios, no posee consciencia; para ello se necesita la complejidad del cerebro entero. Incluso un cerebro humano intacto puede es-

Resumen/Al borde de la vida

- Los virus son parásitos que bordean la frontera entre lo vivo y lo inerte. Cuentan con los mismos ácidos nucleicos y proteínas que constituyen las células vivas, pero requieren de la ayuda de éstas para replicarse y propagarse.
- Durante decenios, los expertos han discutido acerca de si los virus están vivos o no. Este debate ha distraído de una cuestión que reviste mayor importancia: el papel fundamental de los virus en la evolución.
- Ingentes cantidades de virus están en constante proceso de replicación y mutación. Constituyen la principal fuente de innovación génica. Un gen emergente, responsable de una función útil, puede incorporarse al genoma de la célula huésped y establecer allí su residencia permanente.

RUSSELL KIGHTLEY *Science Photo Library*

tar vivo y carecer de consciencia, es decir, en estado de "muerte cerebral". De forma similar, ni genes ni proteínas individuales, sean éstos celulares o víricos, poseen vida por sí mismos. Una célula a la que se ha extirpado el núcleo se asemeja al estado cerebralmente muerto, en el sentido de que carece de plena complejidad crítica. Tampoco el virus alcanza el nivel crítico de complejidad. Por tanto, la vida en sí misma corresponde a un estado complejo y emergente, pero consta de los mismos ladrillos básicos que constituyen un virus. Desde esta perspectiva, los virus, aunque no totalmente vivos, pueden considerarse algo más que materia inerte: están a un paso de la vida.

En octubre del año pasado, se publicaron ciertos descubrimientos que ilustran, una vez más, cuán cerca de la vida podrían hallarse algunos virus. Didier Raoult y su grupo, de la Universidad del Mediterráneo en Marsella, completaron la secuenciación del genoma del mayor virus conocido, el Mimivirus, descubierto en 1992. Este virus, del tamaño de una bacteria pequeña, infecta las amebas. Los investigadores detectaron numerosos genes que se suponían exclusivos de organismos celulares. Algunos de ellos participan en la síntesis de las proteínas codificadas en el ADN vírico y quizá faciliten al Mimivirus la cooptación del sistema de replicación de la célula huésped. En la opinión de estos expertos, la enorme complejidad del complemento genético del Mimivirus desafía la frontera establecida entre los virus y los organismos celulares parasitados.

Impacto en la evolución

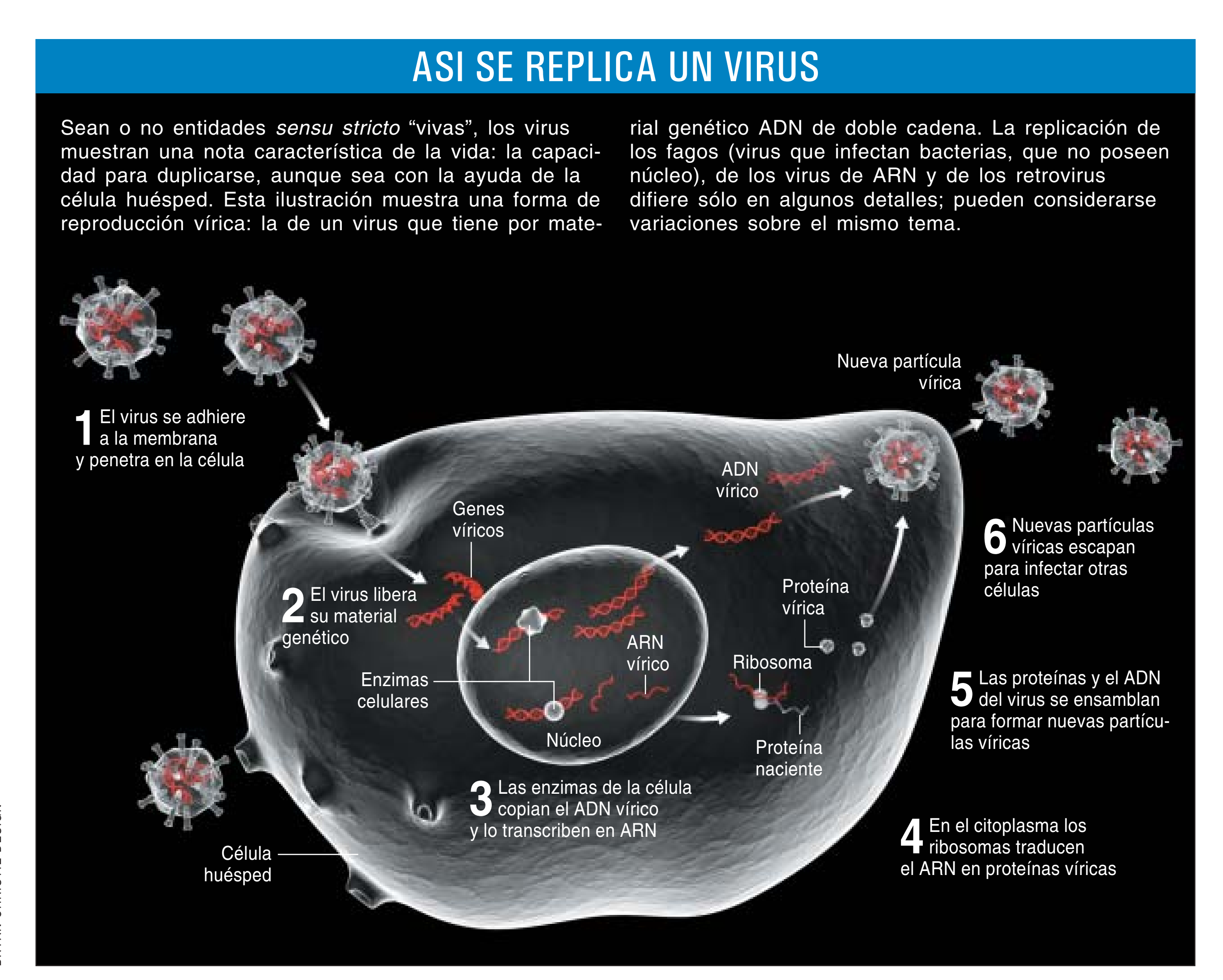
La controversia en torno a la inclusión o no de los virus entre los seres vivos nos lleva a una pregunta radical: ¿cuál es el sentido de este debate? ¿Se trata sólo de un ejercicio filosófico, de esgrima retórica sin trascendencia en la realidad? En mi opinión, el tema reviste suma importancia, puesto que la respuesta influye en nuestra percepción de los mecanismos de la evolución.

Los virus poseen su propia historia evolutiva, tan antigua que se remonta a los albores de la vida celular. En ese ámbito, algunas enzimas de reparación víricas —que se ocupan de escindir y resintetizar ADN dañado, y reparar las lesiones causadas por radicales de oxígeno, entre otras tareas— son exclusivos de algunos virus y han permanecido casi inalterados a lo largo de miles de millones de años.

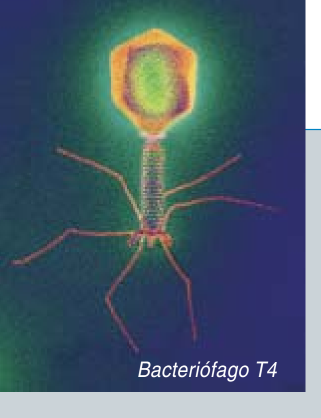
No obstante, los estudiosos de la evolución sostienen, en su mayoría, que, al no poseer vida, carece de

ASI SE REPLICA UN VIRUS

Sean o no entidades *sensu stricto* "vivas", los virus muestran una nota característica de la vida: la capacidad para duplicarse, aunque sea con la ayuda de la célula huésped. Esta ilustración muestra una forma de reproducción vírica: la de un virus que tiene por material genético ADN de doble cadena. La replicación de los fagos (virus que infectan bacterias, que no poseen núcleo), de los virus de ARN y de los retrovirus difiere sólo en algunos detalles; pueden considerarse variaciones sobre el mismo tema.



BRYAN CHRISTIE DESIGN


Bacteriófago T4

Distraídos por las células

"La discusión en torno a si los virus eran o no organismos acaparó la atención de los biólogos durante casi un siglo. El debate surgió avanzada la segunda mitad del siglo XIX, cuando se declaró que las células constituían los 'ladrillos' de la vida. Al tratarse de entidades más elementales que las células, no podían, en coherencia lógica, considerarse organismos vivos. El problema terminó por enredarse en una pura disputa semántica".

—Paul Ewald, biólogo evolucionista estadounidense, 2000

sentido traerlos a colación para explicar el proceso evolutivo. Consideran que los virus proceden de genes del huésped que escaparon y adquirieron una envoltura proteica. De acuerdo con este enfoque, los virus son genes del huésped fugitivos que han degenerado en parásitos. Al descartarlos así del entramado de la vida, las contribuciones que éstos hayan podido realizar al origen de las especies y al mantenimiento de la vida se han ignorado. (A modo de botón de muestra, sólo cuatro de las 1205 páginas de la edición de 2002 de *The Encyclopedia of Evolution* están dedicadas a los virus.)

Ni que decir tiene que los biólogos evolucionistas no niegan que los virus hayan desempeñado algún papel en la evolución. Pero, al reputarlos inanimados, les asignan el mismo tipo de influencia que los cambios climáticos, pongamos por caso. Tales factores externos seleccionan entre individuos que presentan diversidad de rasgos, controlados genéticamente: los más capacitados para superar estos retos y sobrevivir se reproducirán con éxito mayor y, por tanto, transmitirán sus genes a las generaciones siguientes.

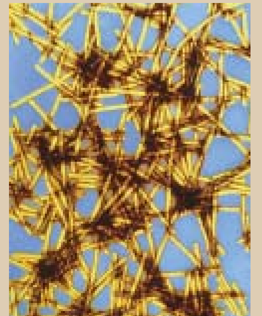
Pero los virus intercambian información genética directamente con los organismos, vale decir, dentro de la propia red de la vida. A los médicos, a los propios expertos en evolución, les sorprende que la mayoría de los virus conocidos no sean patógenos, sino persistentes e inocuos. Establecen su residencia en las células, donde "duermen" durante largos períodos o se aprovechan del aparato de replicación celular para multiplicarse a un ritmo lento y constante. Estos virus han desarrollado numerosas estrategias para evitar que el sistema inmunitario del huésped les detecte: pueden alterar o controlar, mediante sus genes, cada etapa del proceso inmunitario.

Además, el genoma de un virus (su dotación completa de ADN o ARN) coloniza su huésped de forma

Resurgir de sus propias cenizas

Confinados en un mundo tenebroso entre lo vivo y lo inerte, los virus llevan a cabo notables proezas. Así, aunque suelen replicarse sólo en células vivas, pueden multiplicarse, o "crecer", también en células muertas e incluso devolverlas a la vida. De forma sorprendente, algunos virus pueden incluso volver a su "vida de prestado" después de haber sido destruidos.

Una célula a la que se ha destruido el ADN está muerta: carece de las instrucciones genéticas necesarias para fabricar proteínas y reproducirse. Un virus, sin embargo, puede aprovecharse de la maquinaria celular del citoplasma para replicarse. Es decir, que puede inducir a dicha maquinaria a usar sus propios genes como guía para ensamblar las proteínas víricas y replicar el genoma vírico. Esta capacidad para medrar en un organismo muerto se manifiesta sobre todo en huéspedes unicelulares, muchos de los cuales viven en los océanos. (De hecho, en la Tierra existe un sinfín de virus. Los cálculos actuales estiman que sólo en los océanos habitan unas 10^{30} partículas víricas, ya sea en el interior de huéspedes celulares o en flotación libre.)


Virus del mosaico del tabaco

Las bacterias, las cianobacterias fotosintéticas y las algas a menudo mueren porque la radiación ultravioleta solar destruye su ADN nuclear. Algunos virus incluyen o cifran enzimas que reparan moléculas de la célula huésped, devolviéndola a la vida. Atendamos, por ejemplo, a las cianobacterias; poseen una enzima que opera como centro fotosintético, pero puede ser destruida por exceso de luz. Cuando ello ocurre, la célula, incapaz de llevar a cabo la fotosíntesis y el subsiguiente metabolismo celular, muere. Mas los cianófagos codifican una versión de la antedicha enzima fotosintética bacteriana que ofrece mayor resistencia a la radiación ultravioleta. Si tales virus infectan una célula que acaba de morir, la enzima vírica para la fotosíntesis reemplaza la que ha perdido el huésped. Podría describirse como una terapia génica que salva la vida de una célula.

Una cantidad suficiente de luz ultravioleta puede destruir también los cianófagos. De hecho, la inactivación mediante radiación ultravioleta suele utilizarse en el laboratorio para destruir virus. En ocasiones, sin embargo, éstos pueden recuperar la forma y la función. Tal "resurrección" se produce a través de una reactivación por multiplicidad: si una célula individual es portadora de más de un virus inhabilitado, el genoma vírico puede literalmente recomponerse a partir de distintas partes. (Es precisamente esta capacidad de recomposición la que nos permite crear virus recombinantes artificiales en el laboratorio.) En ocasiones, las diferentes partes del genoma pueden también suministrar genes individuales que actúan de forma concertada (complementación) para restablecer en su plenitud una función sin que sea necesario formar un virus entero o autónomo. Los virus constituyen la única entidad biológica conocida que posee esta clase de fenotipo "fénix": la capacidad de resurgir de sus propias cenizas.

DEPARTAMENTO DE MICROBIOLOGIA, BIOZENTRUM *SPL* (*arriba*); JEREMY BURGESS *SPL* (*abajo*)

permanente, añadiendo genes víricos a la progenie del huésped y convirtiéndose, por fin, en una parte fundamental del genoma de la especie infectada. Por tanto, los efectos de los virus resultan sin duda más rápidos y directos que los ejercidos por fuerzas externas que sólo seleccionan entre variaciones genéticas internas, generadas con mayor parsimonia. Tan profusa población, combinada con una elevada velocidad de replicación y mutación, convierte a los virus en la principal fuente de innovación genética: "inventan" nuevos genes constantemente. Luego, estos genes víricos pueden viajar, alcanzando otros organismos y contribuyendo al cambio evolutivo.

Según los datos publicados por el Consorcio Internacional para la Secuenciación del Genoma Humano, se han identificado entre 113 y 223 genes que están presentes en bacterias y en humanos, pero no en otros organismos situados entre estos dos extremos evolutivos; nos referimos a organismos con los que estamos muy familiarizados: la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, la mosca del vinagre *Drosophila melanogaster* y el nemátodo *Caenorhabditis elegans*. Algunos expertos han llegado a pensar que estos organismos, aparecidos más tarde que las bacterias y antes que los vertebrados, perdieron dichos genes en algún momento de su historia evolutiva. Otros sugieren que los genes en cuestión han sido transferidos directamente al linaje humano por la acción de bacterias invasoras.

Con mi compañero Victor DeFilippis, del Instituto para las Vacunas y la Terapia Génica de la Universidad de Oregón, avancé una tercera vía: los virus pudieron haber originado esos genes y, luego, colonizado dos linajes diferentes —por ejemplo, bacterias y vertebrados. Así, un gen que aparentemente las bacterias donaron a los humanos, quizá lo recibieran ambos de un virus.

Philip Bell, de la Universidad Macquarie en Sydney, el autor y otros sostienen que el propio núcleo celular es de origen vírico. La posesión del núcleo —que separa de los procariotas, como las bacterias, a los eucariotas (organismos cuyas células están dotadas de un núcleo genuino) — no se explica sólo por la mera adaptación gradual de las células procariotas hasta convertirse en eucariotas. Antes bien, el núcleo podría haber evolucionado a partir de un gran virus de ADN, que estableció su residencia permanente en el interior de los procariotas. Abonan esta hipótesis ciertas secuencias génicas; muestran que el gen codificador de una ADN polimerasa (una enzima que copia ADN) en el virus T4, agente infeccioso de bacterias, guarda estrecha semejanza con otros genes de ADN polimerasa hallados en eucariotas así como en los virus que los infectan. Patrick Forterre, de la Universidad de París-Sur, tras analizar enzimas responsables de la replicación del ADN, ha llegado a la conclusión de que el origen de los genes que codifican tales enzimas en eucariotas es, con toda probabilidad, vírico.

Desde los organismos unicelulares hasta las poblaciones humanas, los virus inciden en todas las formas de vida, a menudo determinando qué es lo que sobrevive. También los propios virus evolucionan. De hecho, los virus emergentes —el VIH-1 causante del sida, por ejemplo— constituyen las únicas entidades biológicas que ofrecen la oportunidad de presenciar su aparición y, por tanto, de contemplar la evolución en tiempo real.

Los virus revisten suma importancia para la vida. Constituyen una frontera en constante cambio entre el mundo de la biología y el de la química. A medida que vamos desentrañando el genoma de un número creciente de organismos, irán saliendo a la luz las aportaciones de este dinámico acervo génico, antiquísimo. Salvador Luria, premio Nobel, reflexionaba ya en 1959 en torno a la influencia de los virus en la evolución. "¿No representarán los virus, en su fusión con el genoma celular y su reaparición a partir del mismo, las unidades y los procesos que, en el curso de la evolución, han creado los patrones genéticos eficientes que subyacen a todas las células?" Al margen de si consideramos los virus entes vivos o no, va siendo hora de que los reconozcamos y los estudiemos en su contexto natural: el entramado de la vida.

Al filo de la vida

"La verdadera esencia del virus es su fundamental entrelazamiento con la maquinaria genética y metabólica del huésped".

—Joshua Lederberg, premio Nobel, 1993

"Si los virus deberían considerarse o no organismos es una cuestión de gusto".

—André Lwoff, premio Nobel, 1962

"¡Un virus es un virus!"

—Lwoff, 1959

Virus de la enfermedad de la lengua azul

DESY SPL

El autor

Luis P. Villarreal dirige el Centro de Investigaciones Víricas de la Universidad de California en Irving. Obtuvo su doctorado en biología por la Universidad de San Diego. Dedicó su investigación posdoctoral en la Universidad de Stanford a la virología.

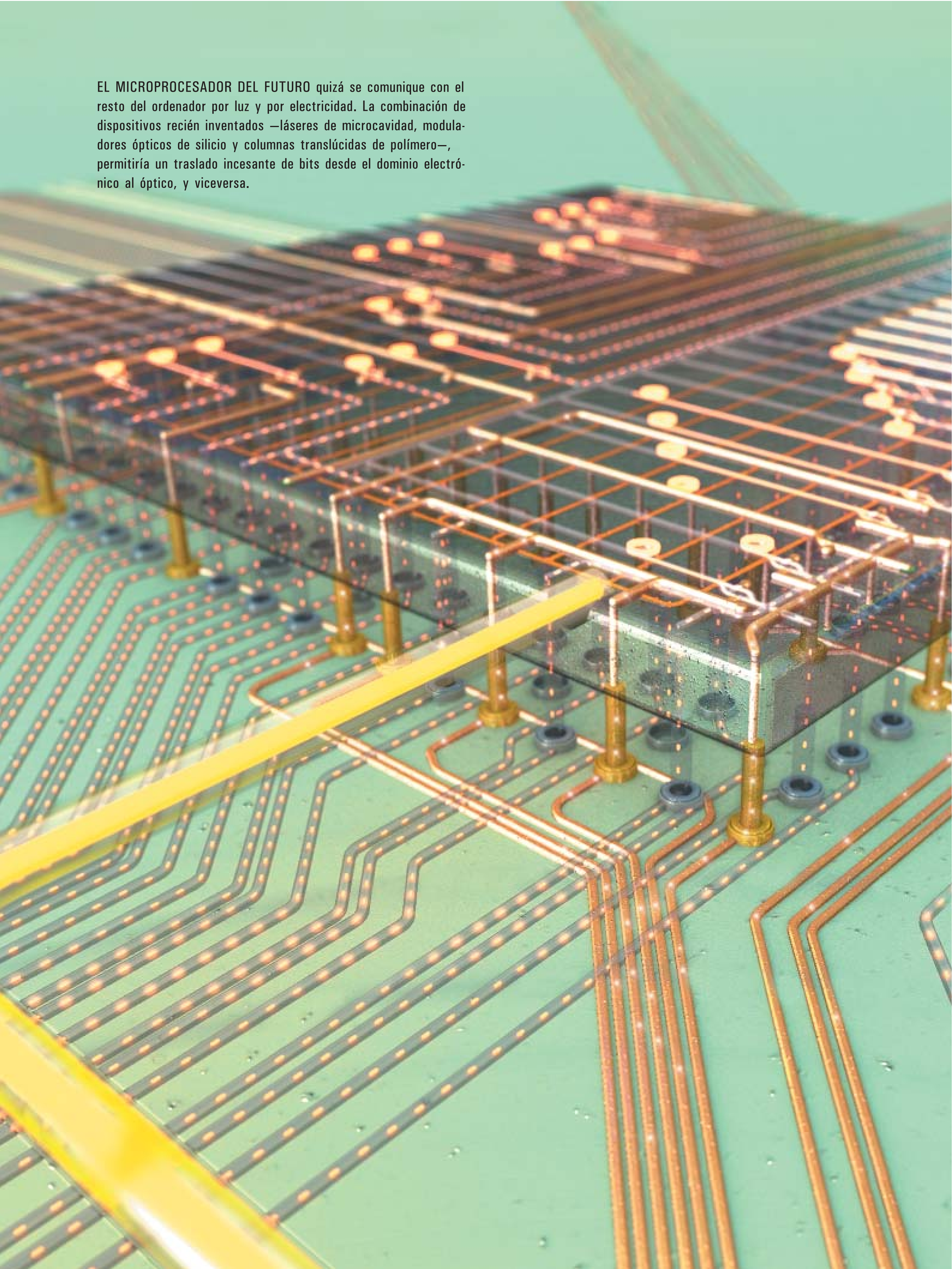
Bibliografía complementaria

QUASIESPECIES VÍRICAS. Manfred Eigen en *Investigación y Ciencia*, n.º 204, págs. 14-22; septiembre 1993.

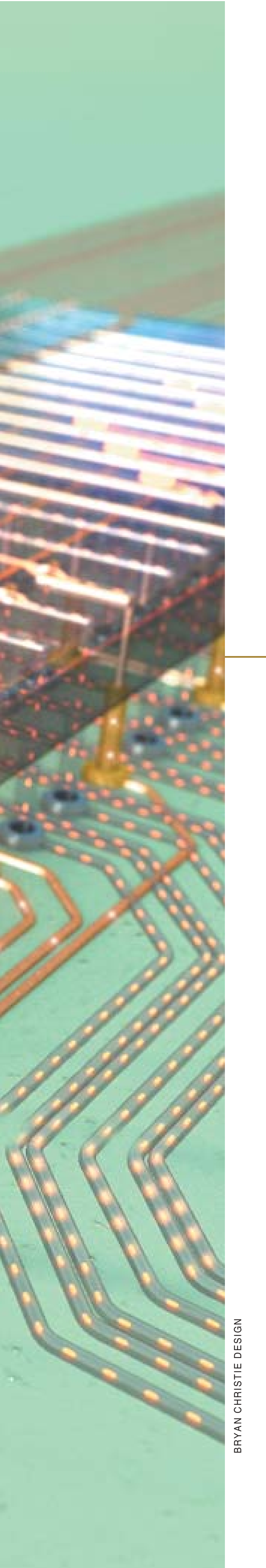
DNA VIRUS CONTRIBUTION TO HOST EVOLUTION. L. P. Villarreal en *Origin and Evolution of Viruses*. Dirigido por E. Domingo et al. Academic Press, 1999.

LATERAL GENE TRANSFER OR VIRAL COLONIZATION? Victor DeFilippis y Luis Villarreal en *Science*, vol. 293, pág. 1048; 10 de agosto, 2001.

VIRUSES AND EVOLUTION OF LIFE. Luis Villarreal. ASM Press (en prensa).



EL MICROPROCESADOR DEL FUTURO quizá se comunique con el resto del ordenador por luz y por electricidad. La combinación de dispositivos recién inventados —láseres de microcavidad, moduladores ópticos de silicio y columnas translúcidas de polímero—, permitiría un traslado incesante de bits desde el dominio electrónico al óptico, y viceversa.



BRYAN CHRISTIE DESIGN

Computación a la velocidad de la luz

Nuevos tipos de conexiones fotónicas entre los microchips electrónicos podrían revolucionar la conformación de los ordenadores de aquí a unos diez años

W. Wayt Gibbs

La velocidad de los microprocesadores viene progresando desde 1995 más deprisa que la de los demás componentes del ordenador. Los procesadores más avanzados ejecutan instrucciones a un ritmo de 3,6 gigahertz (GHz) y, al doble de esa velocidad, ciertas operaciones, como las aritméticas. Pero las conexiones de la placa madre entre el procesador y los chips de memoria y otras piezas del sistema proceden como mucho a 1 GHz. El cerebro de la máquina pasa el 75 por ciento de su tiempo ocioso, a la espera de que le lleguen las instrucciones y datos retenidos en el tráfico atascado.

Hace ya tres años, Anthony F. J. Levy, de la Universidad del Sur de California, afirmaba, en un análisis detallado, que el desequilibrio de prestaciones entre el microprocesador y el acceso a la memoria llegará en unos años a ser insostenible. Señalaba que el material plástico de las placas de circuito impreso succiona las altas frecuencias: por cada aumento de 2 GHz en la anchura de banda de la señal eléctrica, la intensidad de la señal se reduce a la décima parte. Al crecer la frecuencia de reloj, también lo hacen el consumo de energía, el calor disipado y la interferencia electromagnética. Estas constituyen tres de las peores pesadillas de los ingenieros de sistemas. Por otro lado, el grupo industrial International Sematech predice que los enlaces entre procesador y periféricos tendrán que admitir 2 GHz más cada dos años, para que no empeore la congestión existente.

Michael Morse, investigador de fotónica en Intel, cree que se llegará a los 20 GHz con conductores de hasta 50 centímetros de longitud. Según los planes de Sematech, bastarán 20 GHz para los microchips de 32 nanómetros, tres generaciones más allá de los chips de 90 nanómetros aparecidos a principios de 2004. Intel, según su director de arquitecturas de procesamiento, Mark T. Bohr, sacará esa generación al mercado hacia 2010.

Parece, pues, que en el próximo decenio habrá que sustituir los conductores de cobre por conexiones fotónicas que intercambiarán datos mediante la luz emitida por láseres. El jefe técnico de Intel, Patrick P. Gelsinger, aboga por el uso de esas conexiones, aunque sigue sin convencerse de que lleguen algún día a cubrir el tramo, de muy alta velocidad pero corta distancia, que media entre el procesador y el banco de memorias. La fecha exacta de la transición, su precio y a qué conexiones afectará dependerán en gran medida de la naturaleza y diseño de los dispositivos fotónicos.

Ya es frecuente que los datos cambien de formato electrónico a fotónico y viceversa en la periferia del sistema informático, mientras van y vienen entre el ordenador y el CD o DVD, monitor, ratón, cámara, amplificador estereofónico y red de fibra óptica. Pero la mayoría de los ordenadores conservan un núcleo —procesador, memoria principal y la

placa madre que los conecta a los diversos periféricos— enteramente electrónico.

La razón es muy sencilla: las conexiones ópticas son mucho más rápidas que los hilos y las pistas de cobre, pero también cuestan de 10 a 100 veces más. En aplicaciones como la conmutación de miles de llamadas telefónicas o la expedición por Internet de miles de millones de paquetes de datos, la mayor capacidad anula los inconvenientes del coste. Por tal motivo, las comunicaciones de larga distancia en los países ricos van hoy por fibra óptica. Y por la misma razón, Cisco ha invertido en los últimos cuatro años 500 millones de dólares en la creación de un enrutador óptico. Apareció en mayo de 2004; consta de 30 vías de fibra óptica que funcionan a 40 gigabit por segundo (Gb/s): en principio, una anchura de banda total suficiente para cursar el tráfico de Internet de 1,6 millones de viviendas con ADSL. A distancias mayores de 100 metros, nada aventaja a la velocidad de conmutación de la luz. Pero el cobre todavía impera en los enlaces cortos; es el caso de las redes de oficinas y el interior de las torres de ordenador.

Ahora, sin embargo, parece más verosímil un cambio de régimen. Se ha concebido al fin una extensa gama de dispositivos fotónicos que podrían fabricarse en las actuales fábricas de microchips. Su coste, pues, resultaría competitivo. Según el jefe de su grupo de investigación de la fotónica de silicio, Mario Paniccia, Intel quiere aplicar la óptica en todos los niveles, hasta llegar a las comunicaciones entre chips.

Si tal cosa sucede, los ordenadores podrán cambiar mucho de aspecto y de manera de funcionar de aquí a diez años. Algunos cambios darían más velocidad con menor tamaño. Las videocámaras y los reproductores de vídeo portátiles enchufarían sus cables de fibra óptica en los conectores fotónicos que sustituirían a los actuales puertos USB. Ciertas máquinas incluirían unidades de disco holográficas que archivarían cientos de gigabytes en un disco extraíble del tamaño de un CD. Los afortunados poseedores de conexión directa con la red internacional de telecomunicaciones por fibra óptica utilizarían una tarjeta de red óptica para acceder a Internet a más de 1 Gb/s, velocidad mil veces mayor que la de los actuales módems de ADSL o cable.

Otros cambios serían más espectaculares. La máxima velocidad práctica de una conexión electrónica cae en barrena al aumentar la longitud de los cables. Por lo tanto, los chips de memoria y las tarjetas de gráficos deben estar próximas al procesador que les vierte grandes cantidades de información. Pero, como observa Paniccia, una vez que los datos pertenecen al dominio óptico, ya no importa la distancia: una técnica fotónica de bajo coste lo será tanto para medio metro como para mil kilómetros. Muchos de los componentes informáticos que hoy se aglomeran en una torre rectangular que no llega ni al medio metro de alto podrían, en principio, diseminarse por un vehículo, un edificio o una ciudad; la información circularía entre ellos transportada por impulsos de luz.

Deshacer la congestión

Los chips ópticos actuales, como los que sirven de láseres en los reproductores de CD y de fotodetectores en los conmutadores de telecomunicaciones, se obtienen a partir de semiconductores de los grupos III-V. Estos compuestos asocian uno o más elementos de la tercera columna de la tabla periódica (aluminio, galio o indio) con un elemento de la columna quinta (de ordinario fósforo en forma de fosfato, arsénico o antimonio).

A primera vista, los chips III-V parecen una solución ideal para la fotónica. En su interior los electrones se desplazan más deprisa que en el silicio, con lo que los procesadores III-V pueden trabajar a frecuencias mucho más elevadas. Y no sólo emiten luz láser desde cavidades de su superficie, sino que convierten a velocidad deslumbrante en señales eléctricas los destellos recibidos. De ahí que, para construir circuitos ópticos integrados, la investigación fotónica se haya dirigido primero a los compuestos III-V.

Con fosfuro de indio, por ejemplo, construyó en 2003 un grupo dirigido por Daniel Blumenthal y Larry Coldren, de la Universidad de California en Santa Bárbara, una “copiadora fotónica”. Este dispositivo acepta bits fotónicos de cierta longitud de onda, los regenera si se han atenuado y por medio de un láser sintonizable los traslada a otra longitud de onda, sin pasar nunca la información al formato electrónico. Un dispositivo así sería muy útil en un ordenador fotónico del mañana.

Pero comparados con el silicio, los semiconductores III-V resultan de fabricación delicada y enojosa, y eso los encarece. Un microchip de silicio que, fabricado con el proceso estándar CMOS (semiconductor de óxido metálico complementario), cuesta 4 euros, en fosfuro de indio saldría por unos 400 euros. Según Ravindra A. Athale, responsable de programas de fotónica en

Resumen/Computación óptica

- Se prevé que de aquí a diez años las actuales conexiones de cobre entre los componentes interiores de las máquinas llegarán al límite práctico de su ancho de banda.
- Hasta hace muy poco, las conexiones entre microchips por vía luminosa exigían el uso de láseres y detectores fabricados con semiconductores exóticos; sólo eran asequibles para aplicaciones particulares, como los conmutadores de alta velocidad en telecomunicaciones. Pero en 2004 se descubrieron nuevas clases de dispositivos fotónicos susceptibles de fabricarse en las mismas factorías que producen microchips económicos.
- Se ha empezado también a presentar nuevas configuraciones que guían los impulsos de láser entre microprocesadores y placas de circuito, en uno y otro sentido.
- Como las conexiones ópticas pueden operar con una anchura de banda muy elevada lo mismo en distancias largas que en cortas, la introducción de la fotónica en los ordenadores modificaría a largo plazo la conformación de éstos.

PRESENTE Y FUTURO DEL ORDENADOR FOTONICO

Los ordenadores actuales utilizan ya dispositivos ópticos para diversas tareas periféricas. Pero de aquí en unos diez años, habrá componentes fotónicos, todavía en fase de laboratorio o ya próximos al mercado, en el núcleo de las máquinas.

ACTUAL: Los microprocesadores funcionan a más de 3 GHz, pero han de esperar ociosos a recibir los datos de la RAM a sólo 0,4 GHz. Los procesadores modernos pueden extraer datos de la memoria por múltiples hilos, logrando una capacidad global de hasta 51 gigabit por segundo (Gb/s)

EN PROTOTIPO: Conexiones fotónicas entre memoria y procesador que operan a 1,25 GHz por cada guiaondas

EN LABORATORIO: Nuevos métodos para fabricar millares de columnas de polímero sobre los procesadores que permitan, a la vez, conexiones eléctricas y ópticas de alta velocidad con la placa madre.

ACTUAL: Las redes de fibra óptica operan a velocidades de hasta 10 Gb/s, pero la mayoría de los ordenadores utilizan conexiones Ethernet, más económicas, de 0,1 Gb/s

EN PROTOTIPO: Gracias a los moduladores ópticos de silicio construidos por Intel podría haber redes ópticas de coste asequible con velocidades de 2,5 hasta 10 Gb/s

PREVISTO EN 2006: InPhase Technologies sostiene que su primer unidad de memoria holográfica archivará hasta 200 gigabytes (GB) de información en un disco de tamaño CD y la podrá recuperar a 0,16 Gb/s

ACTUAL: Unos haces de hilos conectan las unidades de disco, las tarjetas de red y otros componentes a 40 Gb/s como máximo (a 2,5 Gb/s por cada hilo)

EN PROTOTIPO: En 2004 se presentaron unas placas ópticas que establecen conexiones mediante ondas luminosas a través de canales de plástico sobre placas de circuito. Funcionan a 8 Gb/s por cada guiaonda

ACTUAL: El ratón, la videocámara y otros utensilios se conectan por USB 2.0 al ordenador, a unos 0,48 Gb/s y distancias de hasta cinco metros

EN PRODUCCION: Los conectores de fibra óptica que fabrica Xanoptix, de un precio elevado, pueden transferir datos a 245 Gb/s a distancias de hasta 500 metros

ACTUAL: Las unidades de DVD escriben y reescriben hasta 8,5 GB de información en discos de capa doble; pueden leerla a un máximo de 0,13 Gb/s

EN PRODUCCION: Los grabadores de rayo azul y DVD de alta definición (los dos nuevos formatos de discos de láser azul) almacenan hasta 50 GB en un disco y transfieren datos a 0,04 Gb/s, velocidad que se espera elevar hasta 0,32 Gb/s

BRYAN CHRISTIE DESIGN

la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada para la Defensa (DARPA), la constante mejora de las prestaciones del silicio hace que competir contra CMOS sea como correr delante de un tren: acabará por atropellarnos.

Para que la fotónica llegue algún día a instaurarse en placas madre de cien euros, tendrá que subirse al tren CMOS. De ahí que gran parte de la investigación sobre computación óptica de los últimos años se haya dedicado a buscar procesos de integración de dispositivos electrónicos y fotónicos compatibles con la técnica CMOS. Y este enfoque comienza a dar frutos.

Hace apenas dos años, nadie hubiera podido imaginar que llegaríamos al punto en que nos encontramos, dice Salvatore Coffa, director del laboratorio de fotónica del silicio de STMicroelectronics, en Catania. Cree que sacarán pronto al mercado el primer dispositivo de silicio dotado de funciones ópticas.

Siempre CMOS

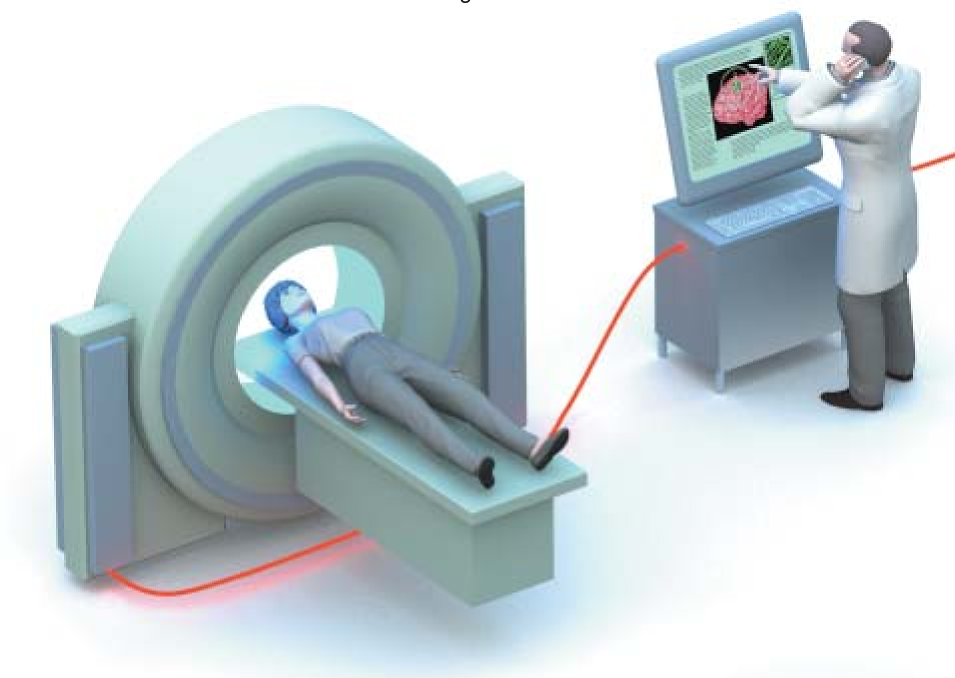
Hay al menos tres caminos para que los componentes fotónicos suban al tren CMOS. Por cada uno de ellos se han logrado avances considerables. El enfoque más conservador, la integración híbrida, es el más cercano al éxito comercial, pues ya ha conseguido fabricar chips para la industria de telecomunicaciones.

En un dispositivo híbrido, los microchips de silicio con funciones lógicas se apiñan en un pequeño encapsulado que también encierra chips III-V, responsables de todas las tareas ópticas. Habría que modificar sensiblemente una factoría CMOS para que su dirección consintiera que el arseniuro de galio o el fosfuro de indio se acercasen a un utillaje que cuesta miles de millones de euros; esas sustancias pueden contaminar la línea de producción de los componentes de silicio. Pero cabe fabricar las dos mitades del dispositivo híbrido en instalaciones separadas y ensamblarlas después.

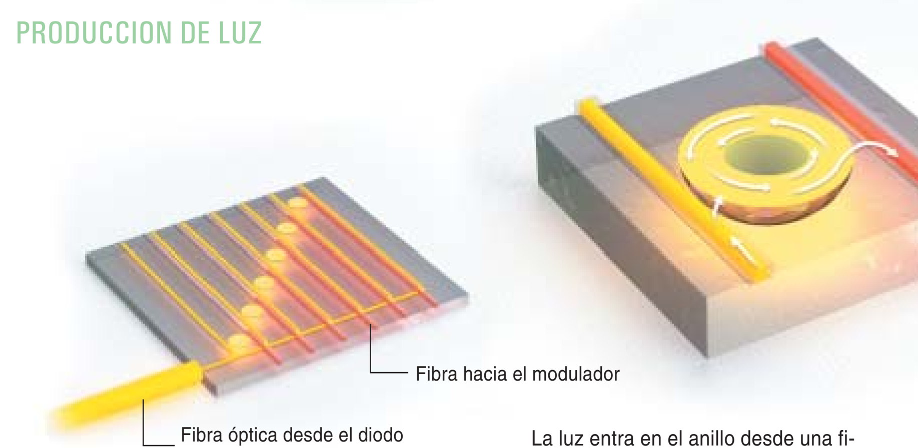
Xanoptix, nueva empresa de Merrimack, New Hampshire, ha aplicado esta técnica para acoplar láseres de arseniuro de galio a chips controladores de silicio. Por esa vía ha creado un conector óptico del tamaño de un dedo pulgar y de as-

LAS GUIAS DE ONDAS

Es probable que los microchips fotónicos encuentren sus primeras aplicaciones en ordenadores de uso específico que hayan de procesar velozmente enormes cantidades de datos, como los utilizados para elaboración de imágenes médicas. Algún día podrían incorporarse al escáner de resonancia magnética nuevos tipos de láseres microscópicos (*abajo, izquierda*) y moduladores de silicio (*abajo, centro*) para transmitir sus imágenes a un ordenador por fibra óptica. Se están desarrollando nuevos conectores que lleven directamente al procesador central el ingente volumen de datos (*abajo, derecha*). Unas conexiones de tan extrema velocidad facilitarían las consultas a distancia de los médicos con sus colegas.

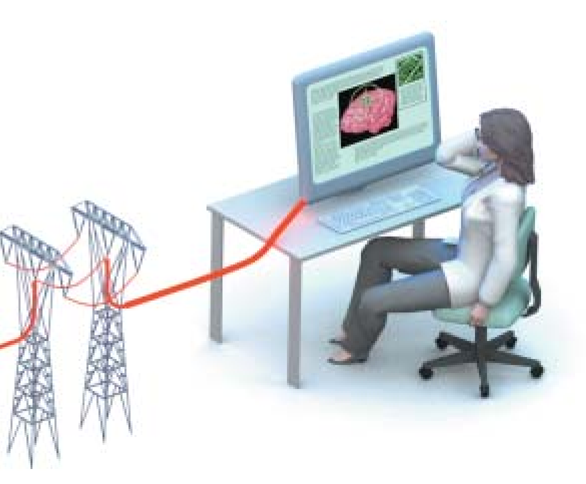


PRODUCCION DE LUZ

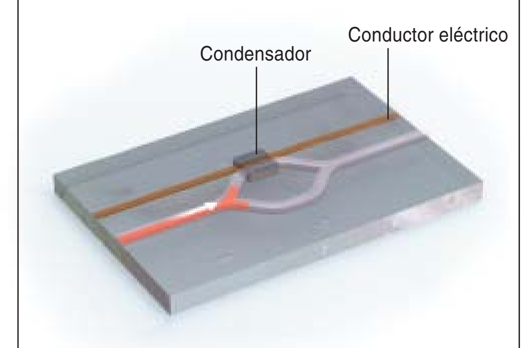


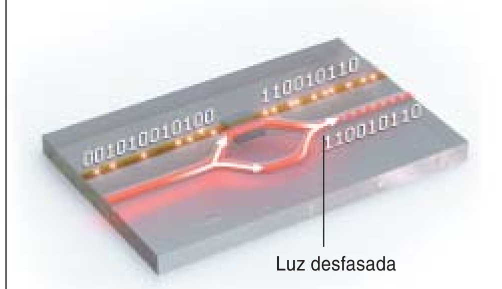
Sobre un microchip de silicio ordinario pueden construirse miles de los microláseres concebidos por Kerry J. Vahala, del Instituto Tecnológico de California. Los diminutos anillos purifican la luz que inyecta un diodo láser de coste muy bajo y cambian su color para que coincida con la longitud de onda estándar que utilicen los demás componentes fotónicos.

La luz entra en el anillo desde una fibra óptica ultrafina (*amarilla*) que pasa a su lado. La luz de una determinada frecuencia resuena en el interior del anillo (*flechas*) y lo estimula para que emita un haz láser por una fibra diferente (*roja*). En un microchip, los anillos láser se formarán probablemente en el contorno de las oquedades; las fibras de conexión irán embutidas en la superficie del chip.



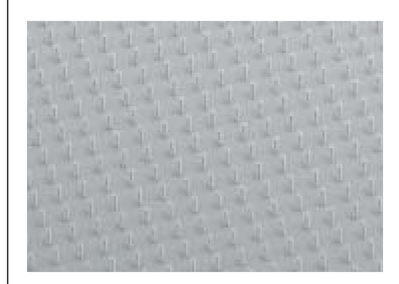
MODULACION DE UNA SEÑAL OPTICA



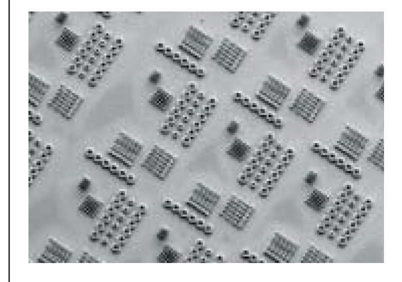


El modulador óptico, construido por Mario Paniccia y su grupo, acepta bits digitales en formato eléctrico y los codifica en un haz luminoso. Primero se divide este haz en dos ramas (*arriba*). Las señales digitales eléctricas llegan a un condensador situado sobre una o ambas ramas y alteran la fase de la luz que pasa junto a esos condensadores. Cuando se recombinan las ramas, los haces de luz desfasada se interfieren; de ese modo se crean impulsos en el haz de salida (*abajo*).

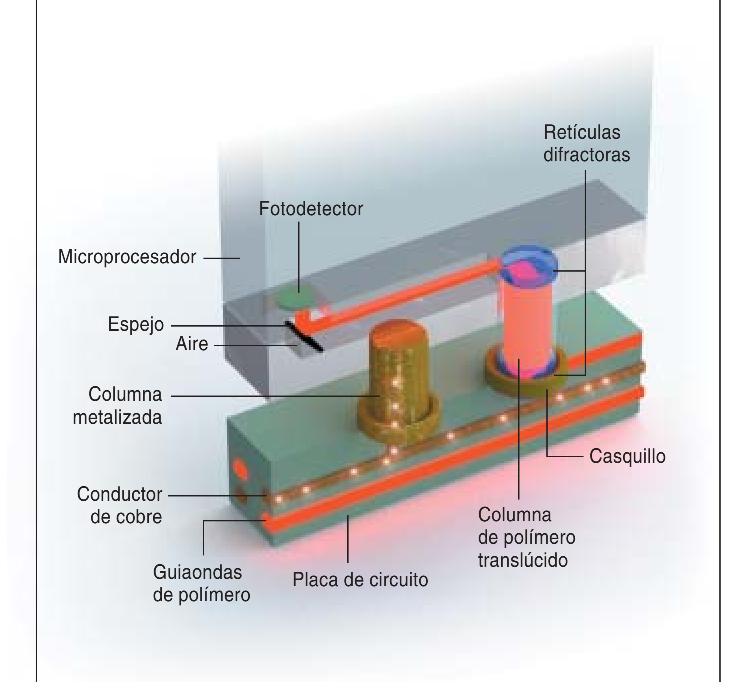
MICROPROCESAMIENTO FOTONICO



Unas diminutas columnas de plástico translúcido, desarrolladas por el grupo de Meindl en el Instituto Tecnológico de Georgia, podrían conectar los microprocesadores a las placas de circuito sobre las que descansan. Millares de estas columnitas se fijarían a la base del procesador.



Las columnas se encajarían en los casquillos correspondientes situados en la superficie de la placa de circuito.



Las columnas dejan pasar señales electrónicas y fotónicas para el intercambio de datos con el microprocesador. Las conexiones eléctricas normales se establecerían desde los conductores a las columnas metalizadas. Los impulsos de luz circularían por los guiaondas de polímero, serían desviados por retículas difractoras de plástico o espejos metálicos y, al fin, los detectarían fotodiodos de silicio.

BRYAN CHRISTIE DESIGN; MUHANNAD S. BAKIR Y JAMES D. MEINDL (*columnas de polímero*)

pecto semejante a un conector USB. Pero a diferencia de los cables USB, que no llegan a los 0,5 Gb/s, Xanoptix asegura que su conector fotónico puede encauzar hasta 245 Gb/s a través de un haz de 72 fibras ópticas, no más ancho que un lápiz.

El enfoque híbrido tropieza, sin embargo, con un problema a largo plazo: cuanto más rápidos sean los microprocesadores, más se calentarán. En los puntos más calientes de algunos chips ya se superan los 80 grados centígrados, y a esa temperatura los láseres III-V empiezan a quemarse. Por tal motivo, los chips optoelectrónicos híbridos tendrían su lugar en conectores exteriores y dispositivos periféricos más lentos, no en el núcleo del ordenador.

Intel ha ordenado a sus científicos que se atengan a CMOS, con la esperanza de poder incorporar algún día, sin abandonar sus fábricas actuales, sistemas fotónicos completos en los chips de los microprocesadores o de las placas madre. Con miras a este tipo de integración, llamado monolítico, se ha intentado que el silicio y algunos otros elementos afines a la técnica CMOS emitan, manipulen y detecten luz.

El silicio parece carecer de la naturaleza cuántica indispensable para generar luz. El grupo de Coffa en STMicroelectronics ha encontrado un modo de salvar parte de ese obstáculo. Mediante la infusión de pequeñas dosis de cerio o erbio en una capa de dióxido de silicio con nanocristales de silicio, han construido chips que lucen en verde o azul cuando se les aplica un voltaje pequeño. Puesto que su luminiscencia no es coherente, no son láseres, sino diodos fotoemisores (LED); eso sí, resultan tan eficientes, sostiene Coffa, como los LED de arseniuro de galio, con la ventaja de que su compatibilidad con la técnica CMOS permite incorporarlos directamente a equipos electrónicos ya existentes. STMicroelectronics proyecta poner pronto a la venta unos acopladores ópticos de silicio mediante los cuales podrán controlarse por ordenador equipos de alta tensión. [En enero, un equipo de Intel anunciaba la consecución de un láser sólo de sicilio, en un único chip. Se basa en una guía de ondas en forma de S, construida con las técnicas fotolitográficas y de grabado ordinarias. Eso sí, sólo puede mantener su funcionamiento durante cien nanosegundos.]

Los LED de silicio valdrían también de fuente luminosa para un láser compatible con CMOS que a principios del 2004 presentaron Kerry J. Vahala y sus colaboradores del Instituto Tecnológico de California. Vahala y otros investigadores han estado haciendo pruebas con discos microscópicos de dióxido de silicio colocados sobre columnas de silicio. Con los bordes suavizados y el diámetro muy controlado, estos discos vienen a ser el equivalente óptico de una de esas salas donde se escucha en una pared lo susurrado en el otro extremo. Parte de la luz que pasa por una fibra óptica contigua escapa al disco y lo rodea por el borde una y otra vez; su intensidad se amplifica más de un millón de veces (*véase el recuadro* “Las guías de ondas”) antes de ser emitida como luz láser.

Las fuentes no coherentes, como los LED, servirían para inyectar luz a los discos, o bien para purificar la luz láser que llegue al chip desde fuera, regenerarla cuando se haya atenuado y sintonizarla en una nueva longitud de onda. En vez de someter los discos a un proceso de grabación, explica Vahala, se podrían crear en ellos cavidades. En el contorno interior de cada oquedad se formaría un láser. Con ello se facilitaría la conexión de los dispositivos a los guiaondas (guías de ondas) y otros componentes fotónicos de la superficie. Estos láseres de ‘microcavidad’ podrían generar señales portadoras de la información que emita el chip.

Para posibilitarlo, se necesita hallar un modo de transferir la información de un formato electrónico a uno óptico. Hasta 2004, el silicio se prestaba mal a este cometido; sólo ofrecía una manipulación lenta e inestable de la luz. Pero en febrero de ese año el grupo de Paniccia descubrió una manera de valerse del silicio para modular un haz láser —es decir, para que parpadee en fase con una señal digital— con una rapidez cincuenta veces mayor.

En el laboratorio de Optica 1A del Centro de Investigación de Intel en Santa Clara, Paniccia puede ya exhibir un chip de silicio, no mayor que un sello de correos, que contiene alrededor de 100 moduladores. Puede verse allí en funcionamiento un modulador de esas características: un ordenador, a medida que procesa el tren de señales de vídeo de un DVD de alta definición, va enviando una copia de cada bit por un cable Ethernet hacia una minúscula placa de circuitos donde va instalado el modulador.

Pese a ser excitado por láser, el dispositivo opera según el mismo principio que un receptor de radio de amplitud modulada [*véase la ilustración correspondiente en el recuadro* “Las guías de ondas”]. El haz láser microscópico se divide en dos ramas; bajo cada rama hay un condensador CMOS —en conexión eléctrica con el cable Ethernet— que almacena y libera electricidad estática. Cuando esas regiones adquieren una carga elevada, los electrones interaccionan con la luz. Al reunirse ambas mitades, las crestas y los valles de las ondas se interfieren, lo que provoca la emisión, por el haz de salida, de unos impulsos de idéntica configuración a la de los bits del tren de vídeo.

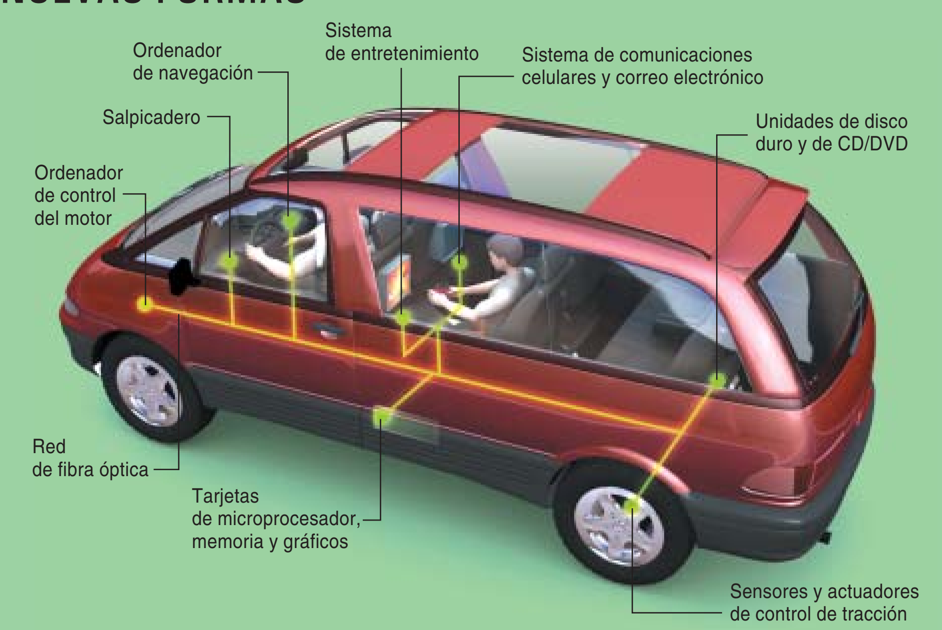
LOS ORDENADORES TOMAN

A largo plazo, las conexiones fotónicas de alta velocidad quizá hagan innecesario que todos los componentes de un sistema informático se alojen en una sola caja. Para una señal eléctrica es muy distinto avanzar cuatro metros que cuatro centímetros, pero en el dominio óptico no hay diferencias apreciables entre una y otra distancia, ni siquiera aunque se tratara de cuatrocientos metros, explica Ravindra A. Athale, de DARPA. Los módulos conectados por vía óptica podrían, pues, disgregarse y seguir funcionando como una sola máquina.

En la carrocería de un automóvil, por ejemplo, podrían embutirse múltiples procesadores, bancos de memoria y unidades de disco, interconectados por fibra óptica. Daimler Chrysler va a incluir enlaces ópticos por láser con capacidad de gigabits en los Mercedes de clase S.

En principio, cada empleado de una empresa futura utilizaría un ordenador formado por diferentes módulos, repartidos por todo el edificio y unidos por vía fotónica. Esta máquina podría “mejorarse” sin más que pulsar una tecla

NUEVAS FORMAS



BRYAN CHRISTIE DESIGN

para acceder a un procesador más veloz o un banco de memoria mayor, en caso de que una tarea exija recursos suplementarios.

Las arquitecturas informáticas creadas por ramificaciones de enlaces fotónicos son todavía en buena medida conjeturales. Los arquitectos de sistemas tienden a no seguir tal dirección porque saben que la técnica aún no existe, reconoce Athale. Pero sin duda ya ha dado sus primeros pasos.

Los impulsos que transportan los datos salen del chip por una sola fibra, delgada como una tela de araña, que se conecta a un fotodetector incorporado a un segundo ordenador, a poco más de un metro de distancia. Los dos ordenadores presentan las escenas de la película con perfecta sincronización.

Hasta el momento se han alcanzado velocidades de modulación de 2,5 GHz. Pero Paniccia confía en poder reducir el tamaño del modulador y hacerlo funcionar a 10 GHz. Combinando todos esos elementos en un chip único, se harán, dice, pequeños dispositivos ópticos de silicio que se enchufarán en cualquier parte y una tarjeta de interfaz de red por 200 euros que sustituirá a un enrutador de 20.000 euros.

Para transmitir a 10 GHz, se tendrá que poder recibir a esa misma velocidad. El silicio es tan transparente como el vidrio a las longitudes de onda del infrarrojo habituales en los dispositivos fotónicos. Sin embargo, añadiendo germanio a la composición —como ya hacen los fabricantes para aumentar la velocidad de procesamiento— se han construido fotodetectores compatibles con CMOS que reconvierten en bits electrónicos los impulsos de luz recibidos.

Lo mejor de ambos mundos

El silicio ha avanzado un largo trecho en dos años como material fotónico. Pero tendrá que ir mucho más lejos si ha de manipular datos en formato óptico a más de 20 GHz. Acaso, entonces, la solución más económica sea un método, hasta cierto punto nuevo, de extender la fotónica hasta la electrónica: la integración polilítica.

La idea general consiste en unir un procesador CMOS a la placa madre mediante un entramado denso de conexiones ópticas y electrónicas. Luego se inyectaría luz al procesador desde unos chips III-V, pequeños y por tanto no demasiado costosos, montados a una distancia de seguridad para evitar el sobrecalentamiento.

James D. Meindl y Muhannad S. Bakir, del Instituto Tecnológico de Georgia, en colaboración con Anthony V. Mulé, de Intel, han presentado varios diseños polilíticos. A uno lo llaman "mar de conductores": se graban en el procesador miles de microscópicos resortes de metal en forma de S, como etapa final de la fabricación; las señales eléctricas pasan por los resortes metálicos y de las cavidades de sus centros surgen señales de luz, que inciden en unas retículas difractoras que desvían los impulsos a guiaondas enterradas en el chip o en la placa madre.

En otra configuración, el procesador se apoya sobre miles de columnas transparentes de plástico, que se encajan en casquillos circulares, también de plástico, fijados a la placa de circuitos [*véase la ilustración correspondiente en el recuadro* "Las guías de ondas"). El grupo de Meindl ha fabricado matrices de columnas regulares, de sólo cinco micras de anchura y 12 de separación. Asimismo, han mostrado que ciertos cilindros y casquillos se pueden metalizar para conseguir conexiones eléctricas en vez de ópticas.

Dentro de 10 o 15 años, será posible que un microprocesador erizado de millares de estas minúsculas columnas palpite al ritmo de los destellos de infrarrojos, al tiempo que lo recorren electrones de alta frecuencia. En el futuro podrían grabarse transistores y conductores en los espacios que separan láseres y guías de ondas. El largo divorcio entre la fotónica experimental y la electrónica de consumo parece concluir al fin.

Bibliografía complementaria

A HIGH-SPEED SILICON OPTICAL MODULATOR BASED ON A METAL-OXIDE-SEMICONDUCTOR CAPACITOR. Mario Paniccia y otros en *Nature*, vol. 427, págs. 615-618; 12 de febrero de 2004.

ULTRALOW-THRESHOLD MICROCAVITY RAMAN LASER ON A MICROELECTRONIC CHIP. Kerry J. Vahala y otros en *Optics Letters*, vol. 29, n.º 11, págs. 1224-1226; 1 de junio de 2004.

SEA OF POLYMER PILLARS ELECTRICAL AND OPTICAL CHIP I/O INTERCONNECTIONS FOR GIGASCALE INTEGRATION. M. S. Bakir y J. Meindl en *IEEE Transactions On Electron Devices*, vol. 51, n.º 7, págs. 1069-1077; julio de 2004.

SILICON PHOTONICS. Preparado por Lorenzo Pavesi y David J. Lockwood. Springer, 2004.

Mecanismos químicos de defensa en las plantas

Los vegetales poseen mecanismos de defensa que reflejen una gran diversidad bioquímica, resultado de interacciones complejas

Jorge M. Vivanco, Eric Cosio, Víctor M. Loyola-Vargas y Héctor E. Flores

Las plantas, organismos sésiles, están obligadas a discriminar entre los diferentes retos que les plantea su entorno y responder a ellos. Estas respuestas a su ambiente biótico y abiótico les permiten la mejor distribución de sus recursos para crecer, reproducirse y defenderse. No debe, pues, sorprendernos que gran parte de las reacciones de defensa se reflejen en una diversidad bioquímica que tiene muy pocos paralelos con otros grupos de organismos. De hecho, el repertorio bioquímico de las plantas es único.

La enorme diversidad fitoquímica y el largo tiempo de evolución de este metabolismo han resultado en interacciones de complejidad creciente. En el caso de las interacciones entre plantas e insectos, por ejemplo, ciertos compuestos con estructuras muy similares pueden ejercer actividades muy disímiles, desde insecticidas hasta repelentes o incluso atrayentes. Tamaña variedad de respuestas, resultado de una compleja coevolución, no sólo resulta fascinante desde el punto de vista biológico, sino que también acarrea consecuencias económicas importantes.

La interacción con organismos microbianos, herbívoros y otras especies de plantas puede ser de carácter positivo, negativo o neutral. Depende, en cada caso, de una serie de vinculaciones complejas, sobre la mayoría de las cuales conocemos muy poco. Haremos aquí hincapié en las interacciones de carácter negativo, casi siempre asociadas a la supervivencia ante el ataque de predadores, parásitos o patógenos; comportan un marco de competencia interespecífica.

Aunque los mecanismos químicos involucrados en estos tres tipos de interacciones pueden ser de naturaleza similar, para su mejor comprensión las abordaremos por separado.

Interacciones entre plantas y microorganismos

La propuesta de una función defensiva para los compuestos fitoquímicos se avanzó hace un siglo. En 1905, Marshall Ward postuló que los "anticuerpos" y las toxinas producidas por la planta desempeñaban una función importante para frenar el proceso infeccioso. Estos compuestos defensivos podían encontrarse, preformados, antes de la infección o podían sintetizarse en respuesta a la misma y ser, por tanto, inducibles o subsiguientes a la infección.

En 1941, Müller y Börger refinaron la concepción de Ward. Bautizaron con el nombre de fitoalexinas a los compuestos químicos sintetizados por la planta en respuesta a una invasión microbiana. La primera fitoalexina fue aislada y caracterizada en 1960 por Cruickshank y Perrin. Al compuesto aislado, un isoflavonoide pterocarpano, se le denominó pisatina; se había aislado a partir de las vainas de guisante (*Pisum sativum*).

La investigación ulterior ha puesto de manifiesto la amplia diversidad de la naturaleza química de las fitoalexinas. Cubre prácticamente todo el espectro químico de los productos naturales que hallamos en los vegetales.

Existe un extenso repertorio de "metabolitos secundarios", presentes en concentraciones variables, en todos los tejidos vegetales adultos, cuya función primordial parece ser la defensa contra invasiones microbianas. A diferencia de las fitoalexinas, estos compuestos se caracterizan por su estado permanente. Tienen por misión servir de barrera inicial a la propagación de bacterias u hongos dentro de los tejidos de la planta. Pueden, pues, ejercer una presión selectiva sobre los patógenos potenciales; éstos, andando el tiempo, desarrollan, por mutación, mecanismos de resistencia, y perpetúan así el ciclo de cambio por mutación en patógeno y hospedador. A ese fenómeno se debe, en parte, la enorme diversidad química de los productos naturales derivados de plantas.

La función primordial de muchos de tales metabolitos secundarios no es necesariamente antibacteriana o antifúngica. Algunos inhiben la germinación de esporas. Varía también su localización en los tejidos. La



1. Ejemplar de Piperácea (*arriba*). Compuestos producidos por plantas Piperáceas y su actividad biológica (*abajo*).

PIPER RETROFRACTUM
Insecticida

PIPER ARBOREUM
Antifúngica

PIPER PISCATORUM
Piscicida, anestésico local

JORGE M. VIVANCO, ERIC COSIO, VICTOR M. LOYOLA-VARGAS Y HECTOR E. FLORES

ubicación de los compuestos antipatógenos difiere de la observada en los compuestos antiherbívoros o alelopáticos.

Los compuestos antipatógenos se alojan principalmente en el exterior de los tejidos y órganos o en el interior de las vacuolas. Los compuestos ubicados en el exterior se hallan asociados por enlaces covalentes o disueltos en una matriz, tal como la pared celular o las cutículas que recubren el exterior de los órganos vegetales. Las agliconas de muchos flavonoides aparecen depositadas, incluso en forma cristalina, en el exterior de las hojas.

Los compuestos alojados en las vacuolas suelen establecer conjugados con carbohidratos o aminoácidos. Su forma activa, la aglicona hidrofóbica, es liberada por hidrólisis enzimática cuando el contenido vacuolar se vacía por la destrucción del tejido durante el proceso infectivo.

Las defensas fitoquímicas inducibles y las constitutivas se han venido entrelazando en el curso de la evolución. Se hallan, pues, sujetas a presiones selectivas similares. A pesar de las innumerables clases de productos naturales que una especie vegetal es capaz de sintetizar y acumular, no son muchos los que sirven como defensas químicas inducibles.

Estos patrones de actividad biológica siguen relaciones taxonómicas. Las distintas familias vegetales poseen perfiles químicos característicos de fitoalexinas que sugieren la

Trans-resveratrol (vid)
Estilbeno

Camalexina (*Arabidopsis thaliana*)
Indol tiazólico

Rhisitina (patata)
Lactona sesquiterpénica

Gliceolina I (soja)
Pterocarpano

Aventranamida (avena)
Amida de hidroxicinamato
y antranilato

Falcarinol (tomate)
Poliacetileno alifático

2. Las fitoalexinas son de naturaleza química muy heterogénea.

existencia de mecanismos de activación génica originados a partir de un antepasado común. Uno de los ejemplos típicos de esta relación nos lo ofrecen las fabáceas (leguminosas, familia del fréjol), en las que un gran número de especies sintetizan fitoalexinas de tipo isoflavonoide; otro, las solanáceas (la familia de la patata y el tomate), donde las fitoalexinas típicas son sesquiterpenoides.

La existencia de excepciones en esos y otros casos avala la hipótesis según la cual las mutaciones posteriores promovieron la activación de genes de vías biosintéticas alternativas que mostraban una ventaja evolutiva. Abundan las pruebas sobre tales puntos de ruptura en los procesos coevolutivos entre patógenos y sus hospedantes vegetales. Así, dentro de un grupo bastante homogéneo de leguminosas cultivadas que sintetizan fitoalexinas isoflavonoides, las habas fabrican fitoalexinas poliacetilénicas (wyerona). La aparición, por mutación, de nuevas fitoalexinas constituye una estrategia para levantar un nuevo muro entre la planta y los fitopatógenos ya adaptados a sobrevivir al arsenal químico que existía con anterioridad.

A través de la ingeniería metabólica podría hoy lograrse un resultado similar. En un futuro próximo, podrían introducirse genes que codifican la síntesis de fitoalexinas novedosas. Rüdiger Hain y su grupo iniciaron en 1993 esa línea de trabajo, en el marco de una colaboración entre la empresa Bayer y varias universidades alemanas. Insertaron el gen de la estilbeno sintasa, proveniente de la vid, en tabaco transgénico. Adquirió éste una mayor resistencia a la infección por el hongo *Botrytis cinerea*.

En experimentos más recientes, desarrollados en el laboratorio de Brian McGonigle, de la compañía Du Pont, se logró la síntesis constitutiva de glucósidos del isoflavonoide daidzeína, un miembro de las fitoalexinas del tipo pterocarpano de leguminosas, en células en cultivo de maíz, una monocotiledónea. El gen introducido, de la enzima isoflavona sintasa, provenía de la soja, una dicotiledónea.

Lo propio y lo ajeno

Ante la invasión de tejidos vegetales por un microorganismo foráneo, la respuesta defensiva inducible más temprana es la muerte celular controlada. Esta “respuesta hipersensible” de las células vegetales ocurre en aproximadamente 24 horas después que la planta percibe un patógeno potencial. Se trata de un fenómeno conocido desde hace varios decenios. Comparte características generales con la apoptosis, o muerte celular programada. El objetivo de esta apoptosis en la zona en la que se ha detectado la penetración de un microorganismo patogénico es el de aislar al invasor.

En una suerte de equivalente biológico a una estrategia de “tierra quemada”, el fenómeno consiste en retirar los nutrientes al atacante, aislar el área por medio del refuerzo mecánico de las paredes celulares de células circundantes y secretar fitoalexinas en la zona aislada. Estos mecanismos resultan eficaces en el caso de fitopatógenos que no son necrotróficos, es decir, aquellos cuyas toxinas propias provocan la



3. *Catharanthus roseus*, que produce alcaloides bisindólicos en sus hojas usados para combatir el cáncer.

JORGE M. VIVANCO, ERIC COSIO, VICTOR M. LOYOLA-VARGAS Y HECTOR E. FLORES

muerte celular, secretan enzimas digestivas que permiten al invasor aprovechar los nutrimentos liberados del tejido muerto o producen ambos efectos.

Los mecanismos de defensa inducibles requieren sistemas de percepción de microorganismos invasores que permitan activar los genes implicados en la respuesta defensiva. Lo mismo que en nuestro sistema inmunitario, este sistema de percepción debe hallarse capacitado para distinguir lo propio de lo ajeno. Tales equivalentes vegetales a los antígenos del sistema inmunitario recibieron el nombre de "inductores".

El primer inductor caracterizado en plantas fue una proteína de bajo peso molecular, monilicolina A, aislada del hongo *Monilinia fructicola* por Cruickshank y Perrin en 1968. Desde entonces se han identificado numerosos inductores de naturaleza química diversa, con un denominador común: causan, de manera específica, la inducción de genes implicados en reacciones de defensa.

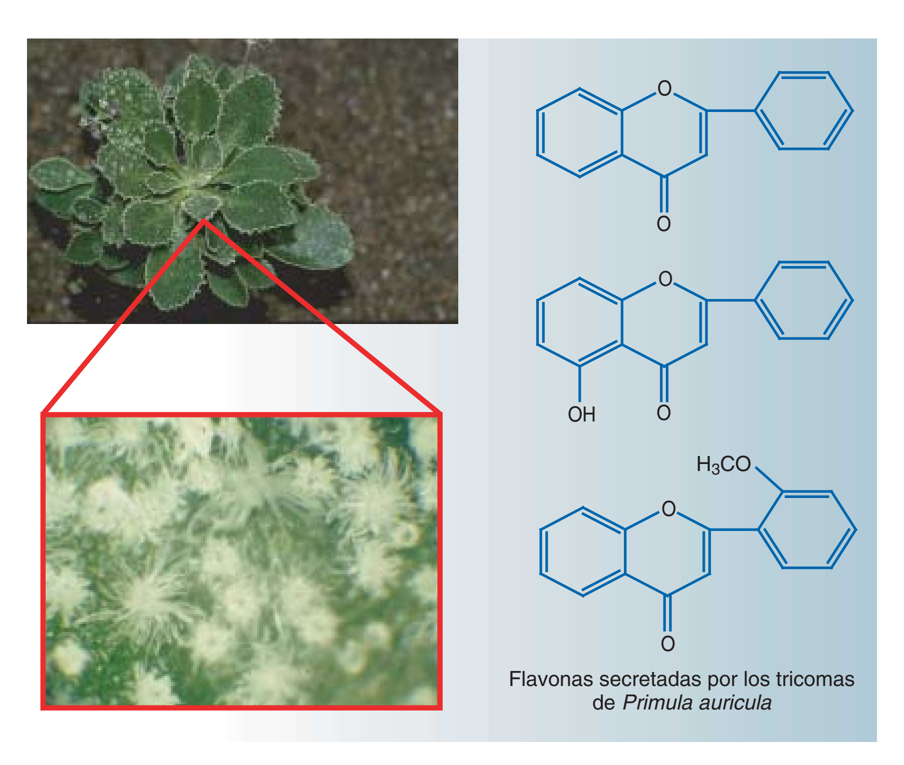
No hemos de olvidar, ciertamente, que las plantas carecen de sistemas de inmunidad celular y humoral propios de células u organismos animales; carecen también de los sistemas circulatorios que los harían posibles. Ahora bien, de ahí a concluir que los animales y las plantas poseen estrategias defensivas distintas media un abismo. Sea por procesos evolutivos de un antepasado común, sea por evolución convergente, plantas y animales parecen poseer mecanismos similares de "inmunidad intrínseca", es decir, la primera línea de reconocimiento de lo ajeno al organismo.

Este mecanismo de defensa corresponde al que en comienzo se llamó, en las plantas, resistencia antihuésped ("non-host resistance"). Se trata de una respuesta defensiva de tipo general contra microorganismos que no son patógenos específicos de la planta en cuestión. A estos mecanismos intrínsecos hemos de añadir los de "inmunidad adaptativa" en animales o los de "resistencia de gen por gen" en los vegetales.

Los sistemas de inmunidad intrínseca no se ordenan al reconocimiento específico de patógenos del organismo, que poseen estrategias para poder evitar ser detectados por el organismo hospedante, sino a la percepción de factores cuya naturaleza química indica la presencia de microorganismos potencialmente nocivos por mecanismos oportunistas. Estos factores, que representan la mayoría de los inductores aislados hasta el momento, pueden ser polisacáridos, proteínas o peptidoglucanos, localizados extracelularmente o en la superficie del hospedante; difieren poco entre grupos de patógenos.

En la terminología actual, los inductores se llamarían PAMP (de las siglas en inglés de "patrones moleculares asociados a patógenos"). Los PAMP se unen a receptores de reconocimiento de patrones (PRR), que operan en la transducción de la señal y en la activación de genes de la célula vegetal comprometidos en las tareas de defensa.

Esta síntesis de las teorías de mecanismos defensivos esenciales en organismos multicelulares nos ha permitido contemplar el campo de las defensas inducibles desde una perspectiva unificada.



4. Exudados foliares compuestos de flavonas disueltas en una matriz de terpenoides recubren la superficie de las hojas de *Primula auricula* y representan una estrategia defensiva de tipo constitutivo bastante común. Las flavonas son segregadas por los tricomas glandulares de la superficie de las hojas.

E. WOLLENWEBER, UNIV. DE DARMSTADT (*fotografías*); JORGE M. VIVANCO, ERIC COSIO, VICTOR M. LOYOLA-VARGAS Y HECTOR E. FLORES

Respuestas locales y sistémicas

La respuesta de defensa se manifiesta en dos niveles. Ambos se inician, directa o indirectamente, con la percepción de un PAMP por un PRR (o el producto de un gen específico de un patógeno y su receptor correspondiente en la planta en las interacciones del tipo gen-por-gen).

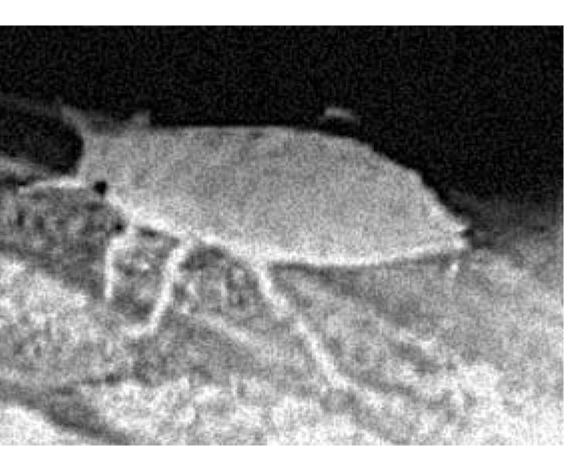
El primer nivel de respuesta es local, implica la síntesis de fitoalexinas y puede o no incorporar el elemento apoptótico de "respuesta hipersensible". Los efectos posteriores son sistémicos, se manifiestan a distancia y vienen instados por la señalización secundaria producida por las células apoptóticas o células que han activado genes defensivos.

Las respuestas secundarias preparan a tejidos y órganos para defenderse de un proceso infectivo. Tales reacciones comprenden una elevación de los niveles de toxinas defensivas constitutivas, de receptores de patógenos y de reforzamiento estructural de paredes celulares en tejidos. El proceso determina un cambio substancial en el perfil metabólico de las células activa-

das, con su repercusión consiguiente en la menor productividad de la planta.

Cuando están dirigidas contra patógenos, ese tipo de respuestas constituye lo que se ha dado en llamar “resistencia sistémica adquirida” (SAR) o “resistencia sistémica inducida” (ISR). Pese a las pruebas iniciales obtenidas por el grupo de Pieterse, de la Universidad de Utrecht, que distinguía estos dos fenómenos por sus señales químicas, se les tiende a usar aún de manera intercambiable. (Se debate hoy si “cebar” artificialmente a las plantas resulta más rentable que aplicar plaguicidas a los cultivos.)

La señalización sistémica secundaria se caracteriza por su complejidad. Intervienen el metabolismo secundario y el patrón bioquímico de los lípidos de membrana. A ese nivel, la señalización, de índole preferentemente general, se comparte entre las respuestas defensivas ante la agresión de microorganismos y ante herbívoros.



5. Fotografía del áfido *Diuraphis noxia* caminando sobre las raíces de *Arabidopsis thaliana*.

JORGE M. VIVANCO, ERIC COSIO, VICTOR M. LOYOLA-VARGAS Y HECTOR E. FLORES

Todas las vías de la señalización identificadas contienen elementos volátiles. Al parecer, cumplen éstos una función de transmisión de la información en el seno de la propia planta y entre plantas distintas. Los tres elementos principales abordados han sido, en orden cronológico, etileno, ácido salicílico y su éster metílico y el ácido jasmónico y su éster metílico. Este último forma parte de un sistema extenso de mensajeros intracelulares e intercelulares, incluido el metabolismo de lípidos de membrana; dentro del sistema se siguen identificando nuevas señales moduladoras.

El etileno es la única hormona volátil específica de las plantas. Se descubrió en los albores de la fisiología vegetal, junto con las auxinas (derivados del triptófano). Su carácter de mensajero en tareas defensivas se halló, sin embargo, en fecha muy reciente. La emisión de etileno por tejidos vegetales dañados permite la activación sistémica de genes defensivos en tejidos sanos distantes de la zona dañada o de plantas alejadas que podrían estar expuestas al mismo agente invasor o herbívoro.

Bart Geraats, del laboratorio de Kees van Loon en la Universidad de Utrecht, ha obtenido pruebas de la participación decisiva del etileno en la resistencia contra patógenos. Trabajando con plantas de tabaco insensibles al etileno, mostraron éstas una susceptibilidad al ataque de patógenos muy alta en comparación con fenotipos silvestres. Más aún, sólo podían cultivarse en condiciones asépticas. Y lo que reviste mayor interés, la aplicación de activadores químicos sintéticos de SAR, tales como el benzotiadiazol (BTH), que inducen esta resistencia adquirida, no incrementaba la resistencia en este genotipo insensible al etileno.

Otro mensajero volátil es el éster metílico del ácido salicílico (un precursor de la aspirina). La inducción de la producción de esta señal sigue un mecanismo similar al del etileno. La emisión del éster sirve, además, como señal para cierto tipo de depredadores de insectos herbívoros. Mediante esa estrategia fascinante, la planta recluta ayuda externa y, al propio tiempo, revela a otras plantas la presencia de un patógeno o un predador. El metil salicilato es también un compuesto de funcionalidad versátil. Además de agente de señalización, participa en interacciones alelopáticas.

Tal vez la vía de señalización más compleja conocida entre las plantas corresponda a la tendida por lipasas y lipoxigenasas en las membranas celulares. La oxidación y degradación controlada de ácidos grasos insaturados de 18 carbonos de longitud de cadena inicia la ruta de los octadecanoides, u oxilipinas, que tiene una serie de variantes. Entre éstas, el ácido jasmónico, cuyo éster metílico es un componente frecuente del aroma de algunas flores. (Se usa en perfumería.)

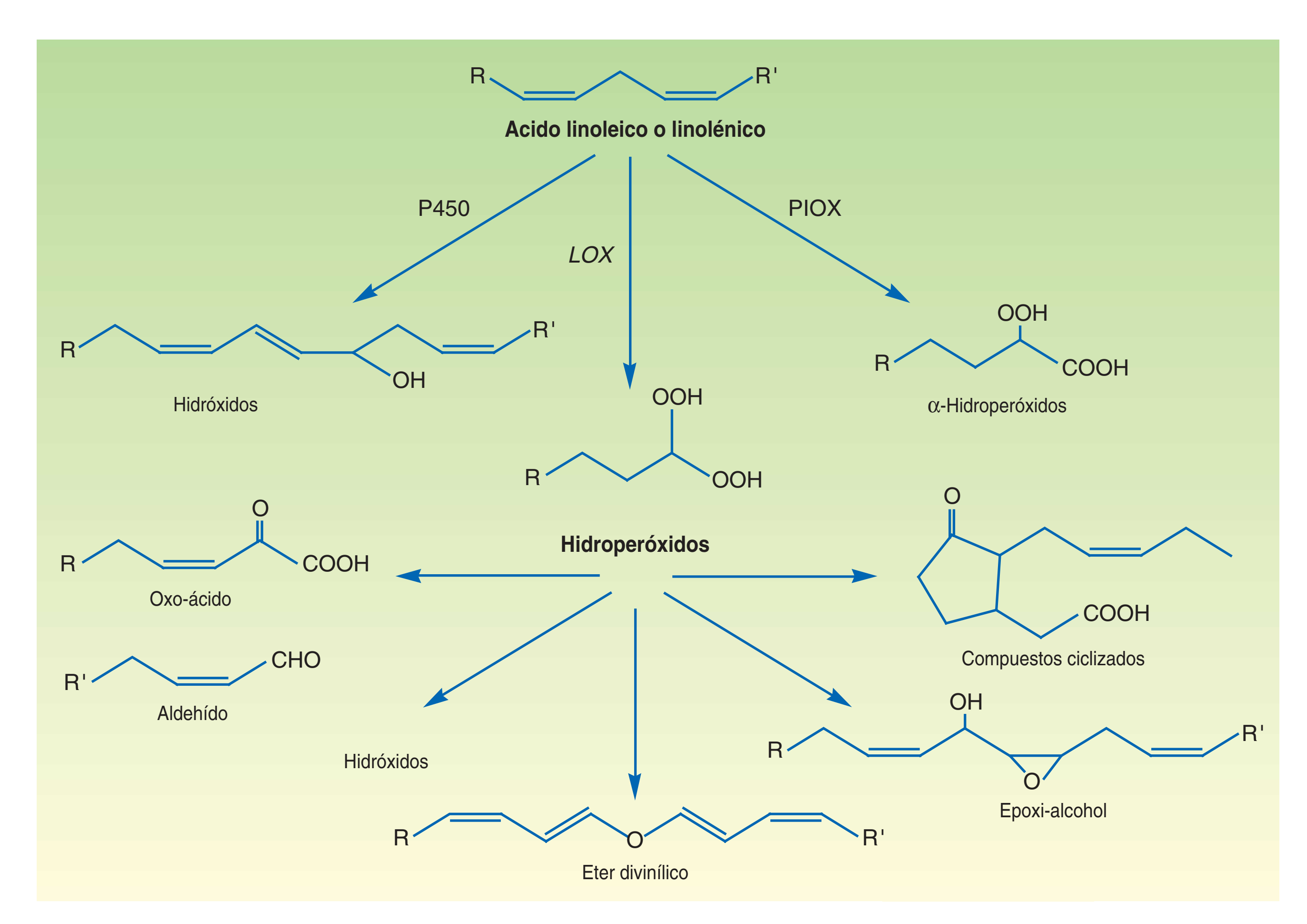
La función del metiljasmonato en la inducción de genes relacionados con la defensa fue descubierta a finales de los años ochenta por Clarence Ryan y Edward Farmer, entonces en la Universidad de Washington. Su identificación permitió la progresiva elucidación de una compleja vía de señales que comprende, aparte del jasmonato, una variedad de aldehídos volátiles, derivados de ácidos grasos por peroxidación y escisión de la cadena alifática y llamados “volátiles C6”, componente primario de la emisión. De manera similar al ácido salicílico, estos compuestos cumplen una función preponderante en las interacciones no sólo con microorganismos, sino también con herbívoros.

Interacciones entre planta e insecto

Para percibir la presencia de insectos herbívoros, las plantas se valen de las secreciones orales del artrópodo. Entre las defensas vegetales directas inducidas por los herbívoros destaca la producción de metabolitos secundarios tóxicos o repelentes y de moléculas volátiles. Estas desempeñan también un importante papel en la defensa indirecta de la planta.

Algunos compuestos volátiles parecen ser comunes a muchas especies; encontramos entre ellos aldehídos, alcoholes, ésteres y terpenoides. Otros compuestos fitoquímicos tienden a ser, por contra, específicos de cada especie. Los hay que sirven para atraer depredadores y parásitos que destruyan a los herbívoros agresores; en otras palabras, ciertas especies vegetales reclaman la ayuda de otros artrópodos.

En algunos casos más complejos, la porción de ácido graso de ciertos compuestos, como la volicitina, sufre una modificación en el intestino de los insectos, que termina en la emisión de compuestos volátiles; éstos atraen parásitos del insecto y, por tanto, defienden a la planta.



6. Biosíntesis de oxilipinas.

JORGE M. VIVANCO, ERIC COSIO, VICTOR M. LOYOLA-VARGAS Y HECTOR E. FLORES

Las plantas dañadas emiten diferentes mezclas de compuestos volátiles específicas del herbívoro. (Las avispas parasitarias, por ejemplo, pueden distinguir entre los componentes volátiles de la mezcla.) No sólo la actividad herbívora de los insectos provoca la liberación de atractores para parasitar a los depredadores, sino que también la oviposición induce dicha liberación. La liberación de sustancias volátiles por las plantas reduce la herbivoría hasta en un 90 %.

Los flavonoides modulan la ingestión y el desarrollo de la oviposición en los insectos. La enzima polifenoloxidasa cataliza la oxidación de metabolitos secundarios fenólicos, resultando en quinonas sumamente reactivas, que se polimerizan en una goma que atrapa a los insectos o reduce la calidad nutricional de las proteínas. El ataque por insectos induce, asimismo, la síntesis de proteasas de cisteína en maíz.

La identificación de mecanismos de respuesta hipersensible contra insectos en varias familias de plantas respalda la hipótesis que admite una amplia distribución de tales mecanismos de defensa entre los vegetales. Muchos metabolitos secundarios podrían resultar tóxicos para los herbívoros no adaptados y obligar a los adaptados a invertir una gran cantidad de recursos en su detoxificación.

¿Cómo distinguen las plantas entre mordidas y heridas?

Los insectos herbívoros producen inevitablemente una herida en la planta hospedante. Por eso, las plantas despliegan sus mecanismos de respuesta cuando entran en contacto con los insectos.

Algunos resultados sugieren que las vías de transducción de señales responden ante los insectos de manera distinta de como operan ante un estrés mecánico. La mayoría de los insectos herbívoros causan un grave daño a los tejidos vegetales de los que se alimentan. Pero muchos insectos del orden Homoptera se limitan a succionar el contenido vascular; para ello, insertan un estilete, circunscribiendo así la agresión celular y minimizando la inducción de la respuesta de herida.

Los insectos agresores activan tanto las defensas locales como sistémicas, mediante vías de señalización en las que toman parte la sistemina, el jasmonato, el ácido galacturónico y el peróxido de hidrógeno. Entre los componentes claves de la respuesta inducida se numeran los genes del estrés oxidativo, señales dependientes de calcio y mecanismos relacionados con la patogenicidad.

La sistemina es un mensajero químico implicado en la transducción de señales instada por la mordida de un insecto en la planta. Induce una cascada de señales basada en oxilipinas, que involucra la producción de jasmonato; este metabolito lidera el sistema de defensa contra insectos herbívoros, que incluye la inducción de inhibidores de proteasas, compuestos fenólicos y polifenoloxidasas.



7. *Datura stramonium*, que produce alcaloides derivados del tropano en sus raíces.

En la respuesta sistémica adquirida interviene la acción de la fenilalanina amonioliasa. Esta enzima cataliza el primer paso en la biosíntesis de los fenilpropanoides y la producción de ácido salicílico (un derivado de esta vía), el cual regula los niveles de metabolitos laterales de la vía de los fenilpropanoides, tales como el ácido clorogénico. A su vez, los productos laterales modifican el sabor y la disponibilidad de la planta para los insectos.

Existe una estrecha relación entre los niveles de ácido jasmónico y los de ácido salicílico. Según parece, los niveles elevados de salicilato inhiben la síntesis de ácido jasmónico y la capacidad de la planta para responder a las señales provenientes de una herida. Pero el ácido jasmónico bloquea la capacidad del ácido salicílico para producir proteínas inducidas por patógenos.

En respuesta a la herbivoría se genera una acumulación de transcriptos distinta de la formada ante el daño mecánico. El ácido jasmónico desempeña un papel central en la acumulación de transcriptos en plantas expuestas a herbívoros. Un estudio de microhileras en *Arabidopsis thaliana* mostró que más de 700 ARNm son afectados durante la respuesta a los herbívoros. En *Nicotiana attenuata,* alrededor de 500 ARNm están involucrados en la respuesta a los insectos. Mediante la técnica de despliegue diferencial y la reacción en cadena de la polimerasa, se ha determinado que la agresión de *Manduca sexta* sobre *N. attenuata* provoca la respuesta de más de 500 genes.

Inhibidores de proteasas

Los inhibidores de proteasas fabricados por las plantas son pequeñas proteínas que contribuyen a la defensa contra insectos. Al bloquear la síntesis de proteasas intestinales, frenan el crecimiento y provocan la muerte por ayuno. Los inhibidores de proteasas bloquean las proteasas de serina, cisteína y aspartato, así como a las metalocarboxipeptidasas. Estos inhibidores se encuentran principalmente en los granos y tejidos de reserva de las plantas; alcanzan concentraciones bastante altas (5-15 % de la proteína total).

En respuesta a las señales desencadenadas durante la producción de una herida, los inhibidores de proteasas no sólo se sintetizan localmente, sino también a distancia. Las señales que induce esta síntesis incluyen algunos oligosacáridos, señales eléctricas, ácido abscísico y sistemina, un pequeño péptido de 18 aminoácidos. La acumulación sistémica de inhibidores de proteasas en las partes no heridas decae con la edad; no se observa en plantas maduras. Por ello, se ha sugerido que la función de estos péptidos en los sistemas de defensa podría estar restringida a una ventana de desarrollo bastante estrecha. Sin embargo, la respuesta local persiste a lo largo de la vida de la planta.

Algunos insectos recurren a estrategias diversas para eludir la defensa vegetal: incrementan su actividad proteolítica, inducen enzimas proteolíticas insensibles a los inhibidores de proteasas o expresan proteasas que degradan específicamente a los inhibidores de proteasas producidos por las plantas y para las cuales no tiene inhibidores.

Además, algunas poblaciones de insectos varían genéticamente en su tolerancia a los inhibidores de proteasas. De hecho, los insectos pueden desarrollar con suma celeridad tolerancia a los inhibidores de proteasas, a partir incluso de fuentes nuevas.

Respuestas de los herbívoros

Como resultado de la coevolución, los insectos herbívoros se han adaptado a las defensas de las plantas. Observamos así que los coleópteros y los lepidópteros hacen frente a la presencia de los inhibidores de proteasas mediante la síntesis de proteasas insensibles a la inhibición. Se trata de una capacidad característica de la especie.

Muchos insectos se hallan dotados para detoxificar metabolitos secundarios; para ello, se sirven de monooxigenasas citocromo P450 y glutatión *S*-transferasas. Otros insectos secuestran las defensas químicas de las plantas y las aplican contra sus propios depredadores. Un caso típico de esta estrategia nos lo ofrece la mariposa monarca (*Danaus plexippus*), cuyas orugas secuestran cardenólidos de las plantas del género *Asclepias* que consumen y los incorporan a su organismo hasta en la etapa adulta. Estos compuestos son tóxicos para las aves depredadoras. Las mariposas aposemáticas, con su coloración llamativa, advierten a sus potenciales agresoras del posible contenido tóxico de sus cuerpos. Dentro del juego interminable de la evolución

JORGE M. VIVANCO, ERIC COSIO, VICTOR M. LOYOLA-VARGAS Y HECTOR E. FLORES

y adaptación, otros insectos se sirven de su capacidad para suprimir la respuesta de defensa asociada con la herida.

Perspectivas

Con frecuencia se proponen métodos de control biológico como alternativa a los insecticidas sintéticos, para así reducir su impacto en el medio agrícola. En este contexto, se confía en los enemigos naturales de las plagas para limitar el daño ocasionado a los cultivos. Sin embargo, no debe olvidarse que los organismos viven en un contexto multitrófico, basado en interacciones quimiobiológicas, y han evolucionado en ese trasfondo. Por lo tanto, dicha medida, aunque deseable, conlleva complejidades y quizá sorpresas.

Los progresos alcanzados en el conocimiento de las respuestas inducidas en las plantas y su regulación, junto con la revolución en genómica y proteómica, prometen replantear la investigación en este campo para encaminarla hacia la explotación predecible de los mecanismos de resistencia endógena. Para comprender las interacciones planta-microorganismo-insecto en la naturaleza y en los ecosistemas agrícolas, se requiere mayor información sobre la fisiología y la genómica de los insectos y sobre su genética poblacional. Una información que revestirá particular interés para reducir la velocidad a la cual los insectos herbívoros adquieren tolerancia natural a las plantas transgénicas.

El etileno y los ácidos salicílico y jasmónico no activan los sistemas de defensa de la planta en forma independiente a través de cascadas lineales, sino a través de complejas redes metabólicas y genéticas que determinan respuestas específicas. El conocimiento de estas interacciones puede aplicarse en el futuro a un diseño racional de plantas transgénicas con resistencia a las enfermedades y a los insectos.

Los autores

Jorge M. Vivanco, Eric Cosio, Víctor M. Loyola-Vargas y **Héctor E. Flores** investigan los mecanismos de defensa de las plantas desde distintos enfoques. Vivanco, profesor de la Universidad estatal de Colorado, se ha centrado en las interacciones entre las plantas y otros organismos. Cosio, docente en la Pontificia Universidad Católica del Perú en Lima, trabaja en bioquímica y fisiología de productos naturales de las plantas. Loyola-Vargas se ha consagrado desde hace varios años a los metabolitos secundarios de plantas en el Centro de Investigación Científica de Yucatán. Flores, decano de la facultad de ciencias de la Universidad estatal de Arkansas, investiga la bioquímica y biología de las raíces de plantas alimenticias y medicinales.

Bibliografía complementaria

THE ADAPTATION OF INSECTS TO PLANT PROTEASE INHIBITORS. M. A. Jongsma y C. Bolter en *Journal of Insect Physiology*, vol. 43, págs. 885-895; 1997.

FITNESS COSTS OF INDUCED RESISTANCE: EMERGING EXPERIMENTAL EVIDENCE SUPPORT FOR A SLIPPERY CONCEPT. M. Heil e I. T. Baldwin en *Trends Plant Science*, vol. 7, páginas 61-67. 2002.

SYSTEMIC ACQUIRED RESISTANCE IN CROP PROTECTION: FROM NATURE TO A CHEMICAL APPROACH. F. Gozzo en *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 51, págs. 4487-4503; 2003.

MOLECULAR INTERACTIONS BETWEEN THE SPECIALIST HERBIVORE *MANDUCA SEXTA* (LEPIDOPTERA, SPHINGIDAE) AND ITS NATURAL HOST *NICOTIANA ATTENUATA*: V. MICROARRAY ANALYSIS AND FURTHER CHARACTERIZATION OF LARGE-SCALE CHANGES IN HERBIVORE-INDUCED mRNAS. D. Hui, J. Iqbal, K. Lehmann, K. Gase, H. P. Saluz y I. T. Baldwin en *Plant Physiology*, vol. 131, págs. 1877-1893; 2003.

PLANT-INSECT INTERACTIONS: MOLECULAR APPROACHES TO INSECT RESISTANCE. N. Ferry, M. G. Edwards, J. A. Gatehouse y A. M. Gatehouse en *Current Opinion in Biotechnology*, vol. 15, págs. 155-161; 2004.

INNATE IMMUNITY IN PLANTS AND ANIMALS: STRIKIG SIMILARITIES AND OBVIOUS DIFFERENCES. T. Nürnberger, F. Brunner, B. Kemmerling y L. Piater en *Immunological Reviews,* vol. 198, págs. 249-266; 2004.

Mareas internas y talud continental

¿Deben su configuración los márgenes continentales a unas olas que circulan bajo la superficie de los mares?

David A. Cacchione y Lincoln F. Pratson

Imaginemos que el mar ha desaparecido ante la playa y se nos permite explorar el territorio que el agua ocultaba. Al principio el camino será fácil. Atravesaremos la plataforma continental, una meseta casi llana compuesta por los sedimentos procedentes de la erosión de los continentes. A derecha e izquierda distinguiremos cauces fluviales excavados en pasadas edades del hielo, cuando la formación de glaciares, al hundir el nivel del mar más de 100 metros, dejó al descubierto la plataforma continental Aquí y allá, veremos por esa planicie campos ondulados, tal vez dunas; deben su origen al movimiento de las olas y las corrientes del océano ahora desaparecido.

Con el tiempo, llegaremos al borde de la plataforma continental. Dependiendo del lugar del mundo en que estemos, se encontrará a sólo cinco kilómetros de la costa (frente al centro de Chile) o a más de cien (en la mayor parte de la costa oriental de los EE.UU.). Allí, donde la profundidad del mar superaba los 100 metros, admiraremos la magnífica vista que nos ofrecerá, con sus tres kilómetros de desnivel hasta el abisal fondo del océano, el talud continental. Esta inclinación representa la vertiente marina de la imponente masa de sedimentos procedentes de la erosión continental y depositados en ese tajo por ríos, olas, corrientes y glaciares.

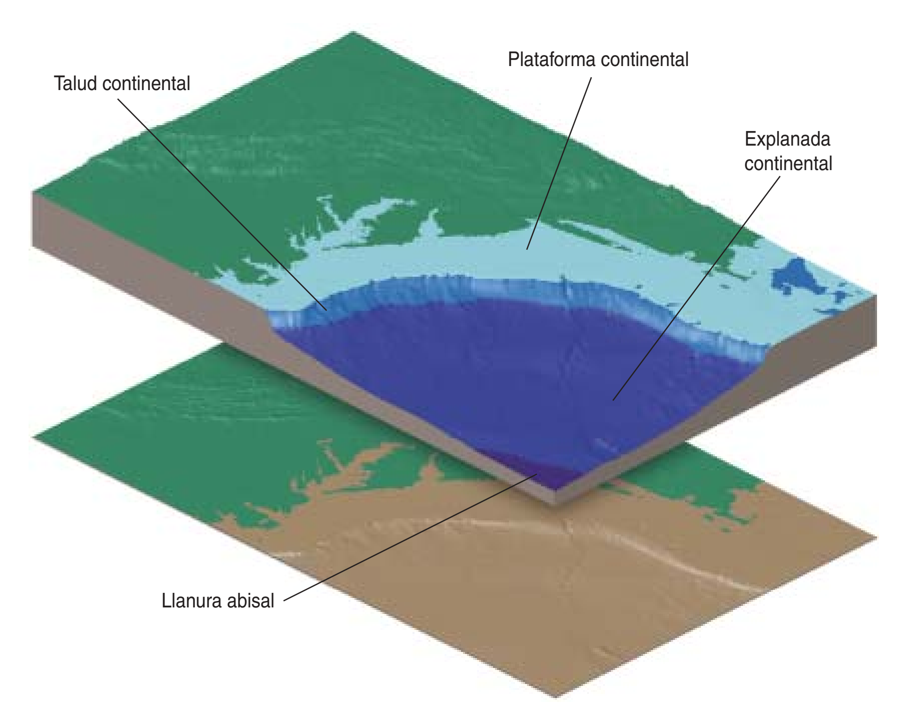
Al igual que la plataforma, la superficie del talud continental varía de un lugar a otro. Donde cañones submarinos —algunos mayores que el famoso de Colorado— tallan el talud, la caída desde la plataforma hasta la base de la pendiente es más brusca. Pero entre estos abismos el suelo desciende mucho más gradualmente; bajar por esas laderas no tan empinadas vendría a ser como hacerlo por un puerto de montaña.

A los geólogos marinos les sorprende que el talud continental no sea más abrupto. Cuando sobre los sedimentos acumulados bajo el agua sólo actúa la gravedad, éstos soportan pendientes estables de 15 grados o más. Sin embargo, la pendiente del 80 por ciento de los taludes continentales no llega a los 8 grados; su inclinación media es de unos 3 grados. Por sí solo, el constante aflujo de sedimentos procedentes de la erosión continental tendería, a lo largo del tiempo, a volver más vertical el talud; queda, pues, claro que una o más fuerzas naturales mantienen suaves esas pendientes. Creemos que el factor primario, inadvertido hasta ahora, reside en las mareas internas: olas sumergidas, en gran parte ocultas a la vista, que laten a través del cuerpo oceánico con el mismo período, dos veces al día, que las mareas lunares sabidas.

CORTESIA DE LA NASA/*American Scientist*



1. LAS OLAS INTERNAS OCEANICAS raramente se descubren a simple vista. No obstante, en el estrecho de Gibraltar sí pueden percibirse cuando existen condiciones favorables. Esta fotografía, tomada desde el Transbordador Espacial en 1984, capta el resplandor del Sol en el agua. Las bandas alternantes de luz y oscuridad se deben a olas internas que alteran la agitación de la superficie. La fotografía está tomada desde el norte, con España en la parte inferior derecha y Marruecos en la superior izquierda.



2. LOS MARGENES CONTINENTALES, como el del nordeste de los Estados Unidos, abarcan la plataforma continental, el talud continental, la explanada continental y la llanura abisal. Hay, no obstante, que exagerar las diferencias verticales para reconocer esas zonas en esta perspectiva de relieve sombreado (*arriba*). Al reproducir la misma zona sin tal distorsión (*abajo*), se ve que la topografía real del fondo del mar es muy chata. Las pendientes más abruptas, las del talud continental, no suelen pasar de unos pocos grados.

DAVID SCHNEIDER Y BARBARA AULICINO/*American Scientist*

Olas bajo las olas

¿Cómo puede haber olas dentro del océano, en sus profundidades? Recuérdese, en primer lugar, que las olas de la superficie se mueven por la separación, la interfase, de dos fluidos: el aire y el agua. Ahora imaginemos que el fluido superior es un líquido, no un gas. ¿Qué ocurrirá? Todavía podría haber olas en la interfase, pero se comportarían de manera algo extraña. Si el líquido superior fuese sólo un poco menos denso que subyacente, en la interfase las olas parecerían tener amplitudes desmesuradas, por lo grandes, y se moverían muy despacio. (Estos mismos efectos se ven en los tanques ornamentales de olas.)

En el interior del océano existen olas interfaciales similares. Se suelen formar en la base del estrato más alto del mar, la “capa de mezcla”. Agitada sin cesar por viento y olas la agitan, presenta unas propiedades bastante homogéneas. Bajo la capa de mezcla la temperatura del agua del mar cambia bruscamente y, con ella, su densidad. La base de esa capa de mezcla tiene por lo general una profundidad inferior a 100 metros; las olas interfaciales que se generan a tan modestas honduras no intervienen en la conformación del talud continental, que se encuentra más abajo. No se requiere ninguna interfaz de densidad peculiar para las olas internas que alteran el talud continental; se forman éstas con el gradual incremento de densidad del agua.

Para comprender mejor cómo se generan las olas internas en tal situación, imaginemos que marcamos una pequeña masa de agua del mar; podríamos, por ejemplo, llenar un globo de agua a cierta profundidad y dejarlo flotar después libremente en ese mismo nivel. ¿Qué sucedería si se empujase el globo hacia arriba, donde el agua es menos densa? Como el agua que llena el globo es más densa que la de su nuevo entorno, la gravedad tiraría de ella hacia abajo. Pero el empuje que adquiriría durante el descenso le haría sobrepasar su posición de equilibrio y, muy pronto, se encontraría rodeada de agua más densa. Entonces se movería hacia arriba. Esta oscilación vertical continuaría hasta que, con el tiempo, el rozamiento la detuviera.

Gracias a esta imagen mental del globo oscilante no cuesta ver cómo se generan en el interior del océano esos movimientos ascendentes y descendentes. Las mareas diarias aportan la energía que los impulsa: no sólo cambian el nivel del mar, sino que producen también corrientes que fluyen por el fondo oceánico. Cuando esas corrientes encuentran montañas y dorsales submarinas, se generan, en el proceso de desvío, oscilaciones verticales, que se propagan lejos de la fuente transportadas por grandes olas que comparten el mismo período de 12 horas de las mareas oceánicas. (Se las llama por eso “mareas internas semidiurnas”.)

Fridtjof Nansen, pionero de la oceanografía y explorador polar célebre por sus tareas humanitarias, descubrió los primeros ejemplos de olas internas en la cuenca ártica, a finales del siglo XIX. Hubo, sin embargo, que esperar a los años sesenta para que los oceanógrafos comprendieran que las olas (y mareas) internas son ubicuas, contienen gran cantidad de energía y mezclan regularmente las aguas oceánicas cuando azotan las pendientes continentales.

En aquel agitado decenio —que tanta huella dejaría en las ciencias de la Tierra—, uno de los autores (Cacchione), Carl Wunsch y John Southard, estos dos sus directores de tesis doctoral en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, avanzaron la idea de que las olas internas podrían, a lo largo de períodos geológicos, configurar el lecho marino. Wunsch, oceanógrafo físico, había realizado cálculos que predecían que las olas internas, al ascender por las pendientes submarinas, causaban fuertes corrientes a lo largo del fondo. Pero la teoría de Wunsch se tenía que poner aún a prueba bajo condiciones controladas en el laboratorio, de lo que se encargó Cacchione como parte de su trabajo de tesis.

La ejecución del ensayo requería un tanque de base rectangular que simulase el océano real. Wunsch y



3. LOS TANQUES ORNAMENTALES DE OLAS contienen dos líquidos (uno transparente y otro azul) de densidades ligeramente diferentes. En ellos se ve la formación, en una interfase, de olas internas con amplitudes sorprendentemente grandes, comparadas con las ondulaciones en superficie de igual longitud de onda; esas ondas presentan un movimiento mucho más lento que el de las olas de superficie. Pueden también formarse olas internas aun cuando no exista interfase discernible. Todo lo que se necesita es un gradiente vertical en la densidad del líquido.

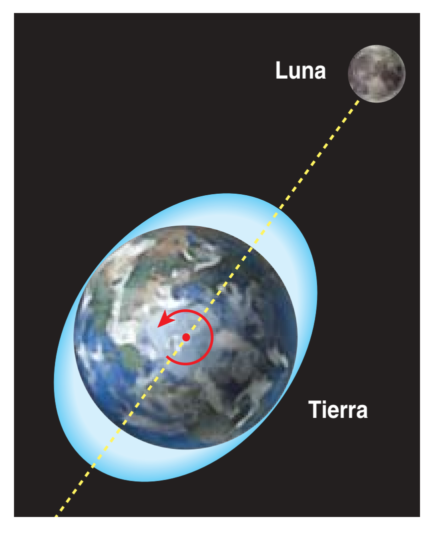
Cacchione procuraron que en el tanque el agua tuviera un gradiente de concentración salina que aumentaba con la profundidad; con la concentración, crecía también la densidad. Generaron una serie de olas internas por medio de una paleta mecánica que oscilaba hacia delante y hacia atrás alrededor de un pivote horizontal centrado en el agua. Semejante disposición del artefacto producía olas internas simples; en ellas, las velocidades horizontales del agua eran máximas en la parte alta y en el fondo del tanque, y nulas en la central. Las olas se propagaban de un extremo del tanque al otro. El fondo de plástico inclinado imitaba el talud continental.

En estos experimentos se producían espectaculares cambios en las olas internas a lo largo del talud simulado, exactamente como la teoría de Wunsch había predicho. Cuando las olas llegaban a la pendiente de plástico, crecía su amplitud, se acortaba su longitud de onda horizontal y aumentaban las velocidades del agua: en muchos aspectos se asemejaba a lo que se ve cuando las olas del agua superficial alcanzan la playa. En algunos casos, las ondas internas formaban olas poderosas y turbulentas con frentes cortantes que viajaban pendiente arriba y después rompían. Estas olas internas rompientes removían frecuentemente el agua con violencia, hacia delante y hacia atrás: esa agitación, en el océano real, erosionaría el fondo.

Con su tanque de prueba, Cacchione y Wunsch exploraron una situación "crítica" especial: en ella, la energía de las ondas internas quedaba, a casi todos los efectos, aprisionada en una estrecha zona a lo largo del fondo inclinado del tanque. Carecíamos por entonces de una explicación del fenómeno. Sin embargo, a través de la investigación experimental Cacchione y Wunsch, se descubrió que, en razón de esa circunstancia crítica, las velocidades del agua y la rotura interna se intensificaban en el talud artificial, y mucho más de lo que ambos autores habían observado en otras pruebas experimentales. En subsiguientes experimentos de laboratorio, Cacchione y Southard mostraron que las olas internas podían crear ondulaciones en los sedimentos del fondo e incluso suspenderlos de nuevo. Viendo estos efectos, Cacchione, Wunsch y Southard propusieron que, si la condición crítica se satisfacía a lo largo de los taludes continentales en el océano real, las olas internas podrían controlar la sedimentación.

Prueba en el barro

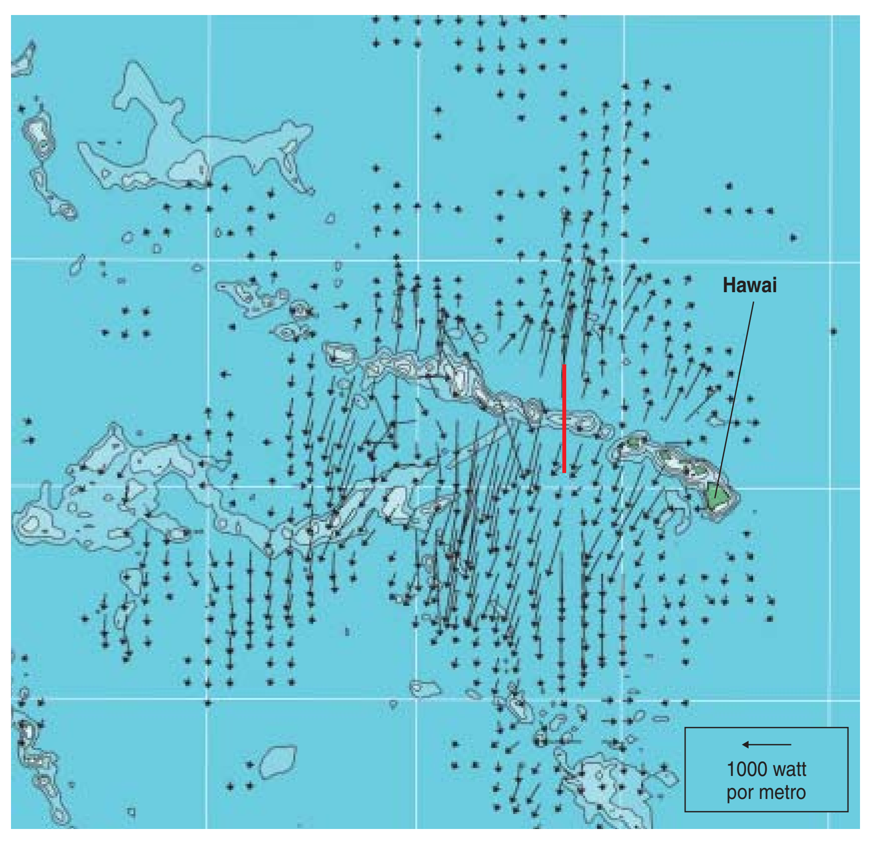
Aunque Cacchione había estudiado a fondo las olas internas en el laboratorio durante su doctorado, conocería su primera experiencia personal de los efectos reales años después, en el Cañón del Hidrógrafo, al sur de cabo Cod. Fue durante una inmersión con el *NR-1*, submarino con propulsión nuclear que la Armada de los EE.UU. dedica a la investigación. Mientras Cacchione y Bruce Heezen cartografiaban el fondo marino y tomaban fotografías dentro

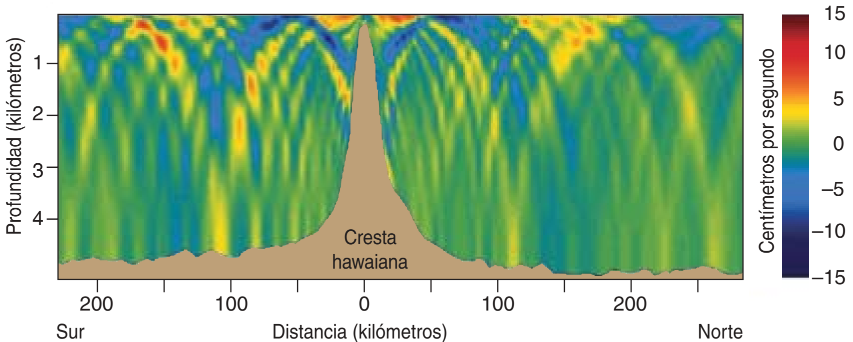


4. LAS MAREAS se producen en virtud de la atracción gravitatoria de la Luna sobre la Tierra, que forma dos anchos abombamientos en el nivel del océano (representados aquí con mucha exageración para mayor claridad). Esas distorsiones siguen a la Luna mientras gira la Tierra, lo que explica el período de doce horas de las mareas; que la amplitud de éstas varíe de un lugar a otro —a veces mucho— se debe a un efecto de resonancia. Las mareas internas también dependen en buena medida de la gravedad de la Luna; de ahí que su considerable energía siga también un período de unas 12 horas.

American Scientist (arriba); BARBARA AULICINO/American Scientist (abajo)

del cañón (uno de los muchos que cortan el talud continental en aquella región), fuertes corrientes balancearon la nave. La velocidad máxima de esos flujos era de medio metro por segundo en la vecindad del fondo marino; su dirección se invertía cada doce horas, más o menos. A diferencia de otros submarinos nucleares, el *NR-1* cuenta con ojos de buey; los científicos pudieron así observar las periódicas oleadas de agua fangosa que las fuertes corrientes levantaban. Cuando éstas alcanzaban su velocidad máxima, las tempestades de fango submarinas oscurecían durante una hora un lecho visible. Esta experiencia convenció a Cacchione de que las olas internas removían los sedimentos del fondo marino y motivó sus posteriores investigaciones de este fenómeno.



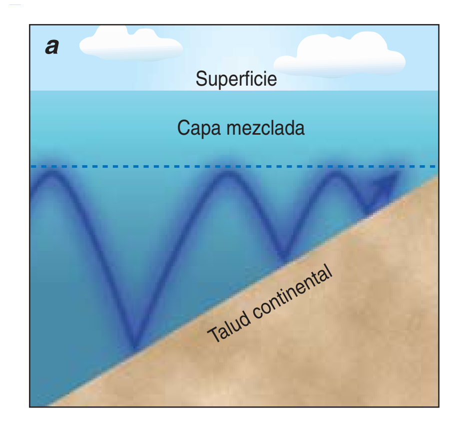


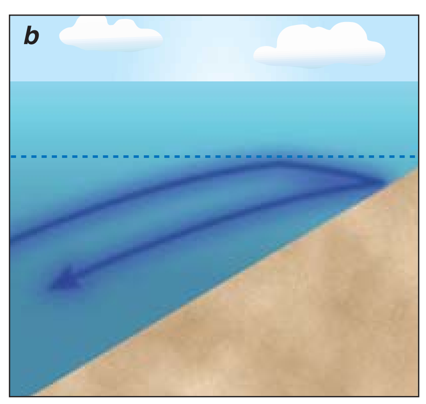
5. SE GENERAN MAREAS INTERNAS allí donde las corrientes horizontales inciden sobre montañas o dorsales submarinas. Un ejemplo bien estudiado de este fenómeno tiene lugar alrededor de las islas Hawai y sus extensiones, sumergidas al noroeste. Mediante el estudio de sutiles efectos de superficie, sabemos que la energía interna de la marea fluye alejándose de la dorsal hawaiana (*flechas en el recuadro superior*). Los modelos numéricos revelan que la energía de estas ondas internas fluye a lo largo de haces arqueados, indicados en amarillo y rojo en el recuadro inferior, un corte vertical de norte a sur para la posición señalada con una línea roja en el recuadro superior.

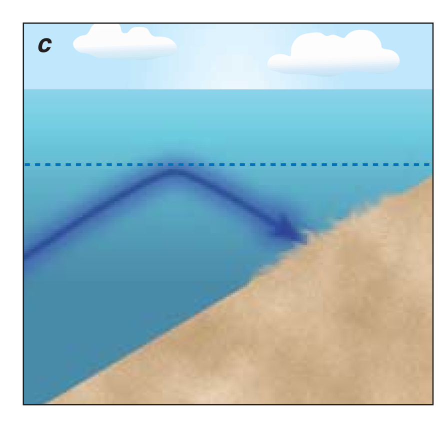
Desde entonces, las inmersiones en otros lugares y las mediciones de instrumentos anclados han venido aportando pruebas de la universalidad y potencia de las mareas internas, lo mismo en el interior de los cañones submarinos que en regiones más regulares, donde las fuertes corrientes del fondo causan presumiblemente efectos de largo alcance. Así, entre 1995 y 1999 un equipo de la Universidad de Washington investigó, mediante boyas instrumentadas, la acción ejercida por olas internas y mareas. Mantuvieron esas sondas a unos 450 metros de profundidad en el talud continental superior, frente al norte de California. En los cinco años que abarcó el estudio, las olas internas fueron siempre la causa de los flujos más fuertes de la vecindad del fondo. Las corrientes más céleres del fondo avanzaban a 40 centímetros por segundo: correspondían a pulsos de agua más fría que cursaban talud arriba, a la manera de una ola mareal de frente cortante frontal abrupto, y mezclaban vigorosamente las aguas del fondo. Se han hallado fenómenos similares en el Oahu hawaiano (a unos 460 metros de profundidad), proximidades de Virginia (a unos 1100 metros de profundidad) y sudoeste de Irlanda (a unos 3000 metros de profundidad, en la base del talud continental), entre otros.

Se multiplicaban por días las pruebas de que las mareas internas creaban corrientes profundas con fuerza suficiente para evitar el depósito, y algunas veces incluso para erosionar los sedimentos acumulados, nos impulsó a reconsiderar la idea de que este proceso podría controlar la evolución geológica del talud continental. Se sabe que muchos otros fenómenos naturales afectan a esta porción del fondo marino: de los movimientos tectónicos de las placas litosféricas al arrastre episódico de material por parte de las *corrientes turbias*, unos corrimientos submarinos de fangos que se producen cuando una zona del fondo del mar se hunde y lanza una densa mezcla de agua y sedimentos por las pendientes submarinas. La proporción, frecuencia y extensión espacial de estos fenómenos varía de un margen continental a otro; resul-

SEGUN R. D. RAY Y D. E. CARTWRIGHT, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 28, PAGS. 1259-1262 (*mapa superior*); BARBARA AULICINO, SEGUN P. E. HOLLOWAY Y M. A. MERRIFIELD, *JOURNAL OF GEOPHISICAL RESEARCH*, VOL. 108 (C4/3126), PÁGS. 1-9. CORTESIA DE LA UNION GEOFISICA AMERICANA (*abajo*)







6. AL CHOCAR LOS HACES DE ENERGIA DE MAREA INTERNA contra los márgenes continentales, pueden producirse resultados diversos. Si el ángulo característico del haz es mayor que la pendiente del fondo marino (*a*), la energía interna de la marea se transmite hacia tierra al rebotar entre el fondo del mar y la base de la capa de mezcla. Si el ángulo característico es menor que la pendiente (*b*), la energía se refleja hacia las profundidades oceánicas. Cuando los dos ángulos son iguales (c), la energía queda aprisionada cerca del fondo marino; puede allí bastar para agitar el sedimento o, al menos, evitar que se depositen los sedimentos en suspensión.

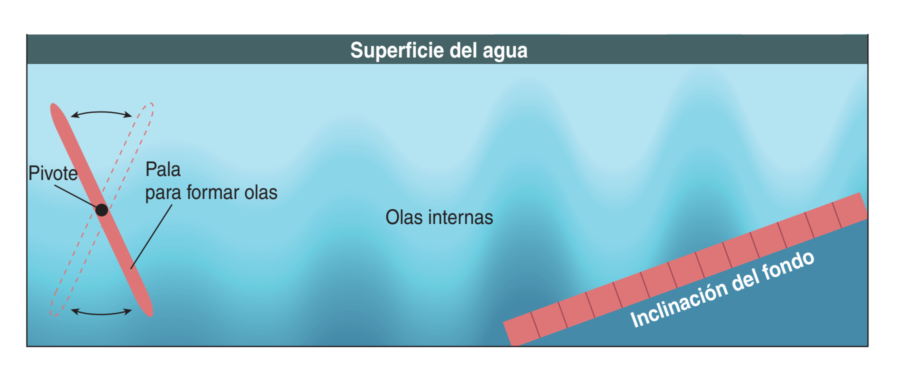
ta por eso difícil evaluar su influencia global en la conformación del talud continental. Fenómeno distinto son las mareas internas. Pasan sobre los taludes del planeta, cada día, cada año y así, en algunas partes del globo, a lo largo de más de cien millones de años. La omnipresencia de las mareas internas, que se acerca a la de la gravedad, nos llevaba a pensar en ellas como la causa principal del bajo gradiente medio del talud continental.

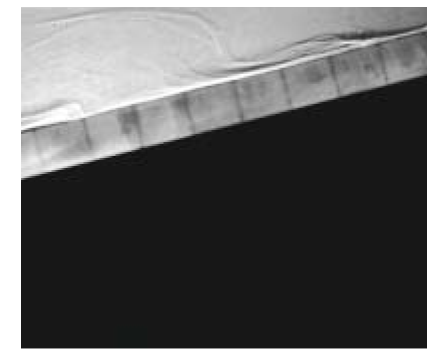
Hace tres años, nos propusimos someter a criba esa idea. Adoptamos una estrategia metodológica harto sencilla. Pero abundemos algo más en la caracterización de las mareas internas.

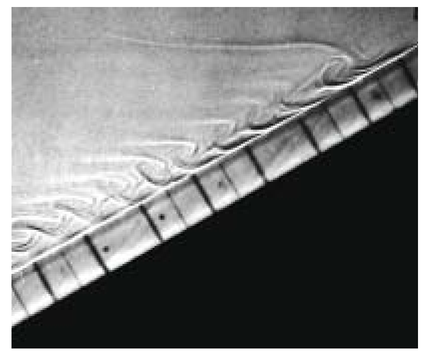
Evaluación crítica

A diferencia de las olas superficiales, la energía de las olas internas se propaga no sólo horizontalmente, sino también verticalmente y en cualquier dirección oblicua. El ángulo de propagación —"ángulo característico"— depende de la frecuencia (en este caso, dos ciclos por día), de la latitud geográfica y de la variación de la densidad del agua con la profundidad. Si el ángulo característico es mayor que la inclinación del fondo del mar, la energía de la marea interna se propagará a aguas someras tras rebotar entre la base de la capa de mezcla y el fondo del mar. Si ese ángulo es menor, tocará en la base de la capa de mezcla, se dirigirá hasta el fondo y de ahí hacia mar abierto.

Entre esos dos extremos se encuentra el caso interesante de que el ángulo característico sea exactamente igual a la inclinación del fondo del mar: la condición crítica que Cacchione y Wunsch habían estudiado en el laboratorio. Bajo esta especial circunstancia, la energía de las olas internas queda aprisionada a lo largo del fondo y las velocidades de la corriente alcanzan un máximo que tiende a mantener en







7. LOS EXPERIMENTOS en tanques de olas nos revelan con nitidez la importancia de la geometría. Ajustando la porción inclinada del tanque a algo menos que el ángulo característico de las ondas internas, se produce una perturbación, en forma de ola abrupta, que asciende a lo largo de la pendiente y después se desintegra (*abajo, a la izquierda*). Cuando se aumenta el ángulo de la pendiente de plástico hasta que iguala el ángulo característico de las ondas internas, se disipa una gran cantidad de energía en movimientos turbulentos a lo largo del fondo (*abajo, a la derecha*).

BARBARA AULICINO (*arriba y abajo superior*); DAVID A. CACCHIONE (*inferiores*)/*American Scientist*

suspensión cualquier sedimento que contenga el agua. Así, cuando el ángulo de propagación coincide con la inclinación del fondo del mar, las mareas internas podrían impedir la sedimentación.

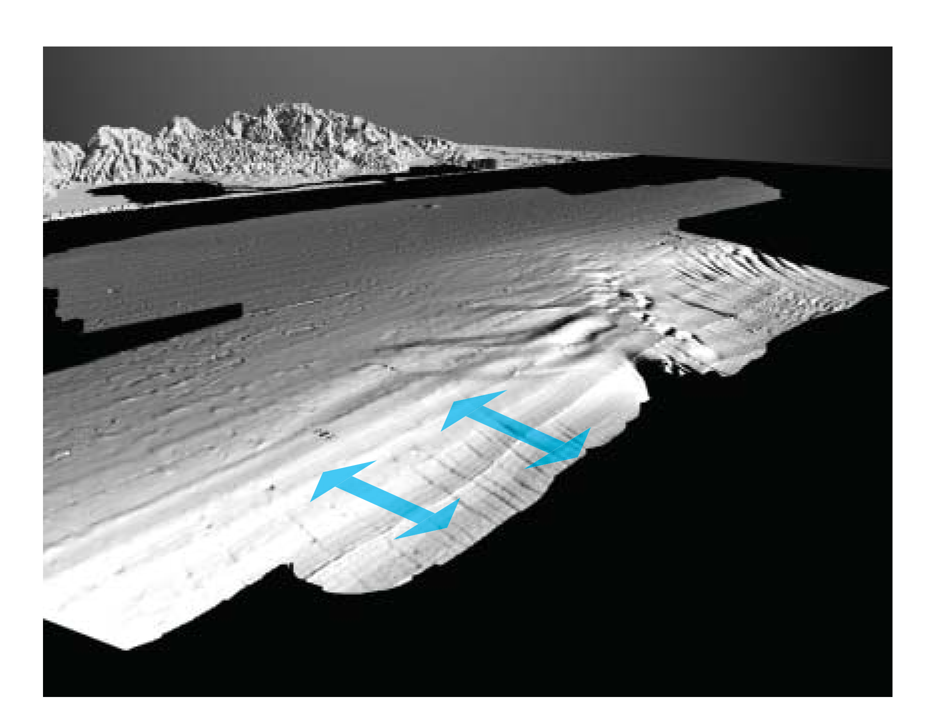
Considerada la estructura de densidad de los océanos, el ángulo característico de las mareas internas viene a caer entre los 2 y 4 grados. ¿Es una mera coincidencia que las pendientes continentales tengan por lo general, en todo el mundo, una inclinación de unos 3 grados, es decir, el ángulo que proporciona a las corrientes de fondo debidas a las mareas internas su máxima fuerza, o casi máxima? Creemos que no. Sospechamos que las mareas internas crean corrientes de fondo que bastan para impedir que los sedimentos arrastrados hasta el borde de la plataforma se acumulen en el talud continental y lleven su pendiente por encima del ángulo característico local.

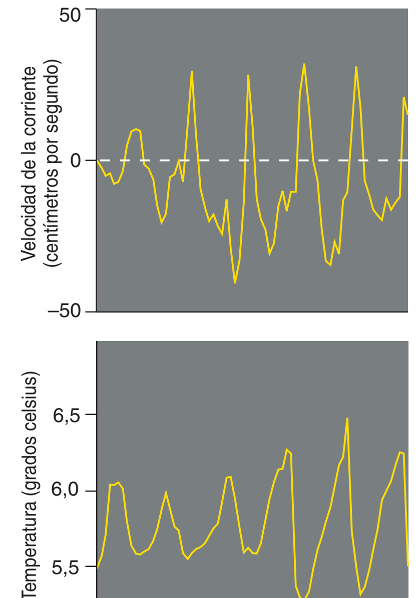
Para comprobar esta hipótesis, examinamos, junto con A. S. Ogston, de la Universidad de Washington, la correspondencia entre el ángulo característico de las mareas internas y la inclinación del talud continental en dos lugares de cuyo fondo oceánico existía una pormenorizada cartografía: frente a las costas del norte de California y frente a la parte meridional de Nueva Jersey. La comparación entre esas dos zonas es significativa porque difieren en varios e importantes aspectos. Por un lado, cerca del norte de California el talud forma parte de un estrecho margen continental que se extiende a lo largo de la frontera entre dos placas tectónicas que están chocando entre sí. Tales movimientos deforman el suelo marino y causan frecuentes terremotos, algunos de los cuales desencadenan avalanchas submarinas. En contraste, la pendiente de Nueva Jersey se integra en un extenso margen continental, situado en el tranquilo interior de una placa tectónica. Los terremotos aquí son mucho más débiles y menos frecuentes; la deformación tectónica cesó hace más de cien millones de años.

Otra diferencia reseñable entre las dos regiones se refiere a la fuente de los sedimentos de su fondo marino. Los ríos Mad y Eel de California septentrional figuran entre los que arrojan mayor cantidad de sedimentos de todos los cursos fluviales de los EE.UU. Una fracción importante de esta copiosa provisión llega hasta el cercano talud continental. En cambio, se acumula escaso sedimento frente a la costa de Nueva Jersey; allí, el talud está cubierto de sedimentos muy finos, procedentes de la erosión de la plataforma continental y arrojados más allá del borde de ésta.

Las condiciones oceanográficas difieren en las dos regiones. El examen de la historia de las medicinas nos revela que las diferencias estacionales en la variación de la densidad con la profundidad sobre el talud continental son mayores en el Atlántico frente a Nueva Jersey que en el Pacífico ante al norte de California. Como resultado, la geometría de las mareas internas cambia más, en el curso del año, frente a aquélla que frente a ésta.

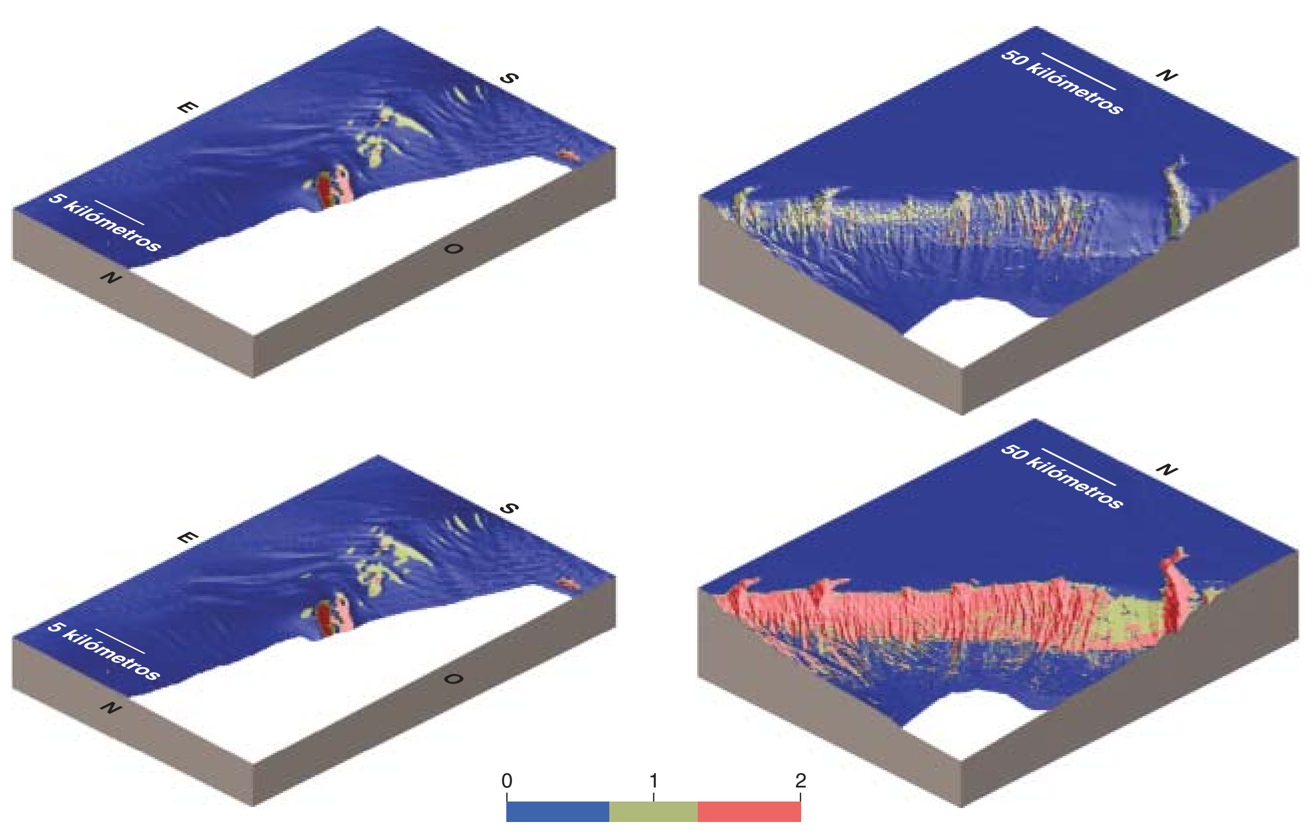
Con nuestro estudio queríamos averiguar si los ángulos característicos en esos dos lugares concordaban con la inclinación local del talud continental. Basándonos en las





8. DISPONEMOS DE LA CARTOGRAFIA DETALLADA de una sección del fondo marino frente a la costa del norte de California (*izquierda*). Instrumentos oceanográficos anclados al fondo de esa región registraron la velocidad de la corriente y la temperatura del agua (*derecha*). Descubrieron el avance, pendiente arriba, de aflujos de agua más fría para volver a precipitarse, con un período de 12 horas (*flechas azules*). El detalle de las huellas indica que la corriente fría debe de corresponder a olas internas de frontal abrupto que avanzan deprisa pendiente arriba y acaban rompiendo.

CORTESIA DE PETER DARTNELL, INSPECCION GEOLOGICA DE EE.UU. (*izquierda*) BARBARA AULICINO/*American Scientist* (*gráficas*)



9. LA COMPARACION DE LA PENDIENTE DEL FONDO con el ángulo característico de las olas internas divide el fondo marino en tres zonas: donde su pendiente es menor que el ángulo característico de las mareas internas (*azul*), donde es más o menos igual (*verde*) y donde es mayor (*rojo*). Tanto en invierno (*arriba*) como en verano (*abajo*), sólo una porción del talud continental en el área occidental estudiada (frente al norte de California, *izquierda*) satisface la condición "crítica": que la pendiente del fondo marino sea igual al ángulo característico de las mareas internas. Para el área oriental de estudio (frente a Nueva Jersey), las condiciones oceanográficas en invierno son tales que las paredes de muchos cañones submarinos cuasiverticales resultan determinantes (*arriba, a la derecha*); en verano, son críticas las zonas entre cañones, donde la inclinación del fondo es suave (*abajo, a la derecha*). Así, en una u otra época del año, la mayor parte del talud continental cumple la condición crítica.

DAVID SCHNEIDER Y BARBARA AULICINO/*American Scientist*

mediciones de temperatura y salinidad del agua compiladas por la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica, calculamos la estructura de densidad media del océano en ambas zonas y dedujimos los ángulos característicos para las mareas internas. El resultado fue notable: en ambos lugares, el ángulo característico resultó igual o casi igual al gradiente medio del talud continental local, unos dos grados en el norte de California y unos cuatro en el sur de Nueva Jersey.

Procedimos después a examinar con más detalle la correspondencia entre el ángulo característico de las mareas internas y el ángulo de inclinación del talud continental. Partíamos de mediciones de alta resolución del fondo del mar, disponibles para ambas zonas de estudio. Técnicos adscritos al Servicio de Inspección Geológica de los EE.UU. e investigadores del programa STRATAFORM (abreviatura de "formación de estratos en los márgenes continentales") obtuvieron esa información topográfica detallada mediante la técnica del cartografiado a franjas. Para ejecutarla, se necesita un buque oceanográfico que lleve en la carena un conjunto de transductores acústicos. Estos instrumentos emiten energía sonora hacia el fondo del mar mediante una serie de haces con forma de abanico que se extienden a babor y estribor. De esta manera, se puede cartografiar a bordo la profundidad del agua en una amplia franja centrada bajo el rumbo del buque. Y consultando sondeos históricos y otros más recientes de la temperatura y salinidad del agua en esos emplazamientos, nos resultó bastante fácil calcular los ángulos característicos de las mareas internas para una densa distribución de puntos de una red geográfica y compararlos después con la pendiente del fondo del mar en los mismos puntos.

Los resultados, más complicados que en nuestro análisis general, respaldaban la hipótesis de la participación de las mareas internas en la conformación del talud continental. En la zona estudiada de Nueva Jersey, grandes porciones del talud, a profundidades de entre 200 y 2000 metros, caen con un ángulo que coincide o es próximo al ángulo característico de las mareas internas en una u otra época del año. En invierno, esta correspondencia

se mantiene incluso en los interiores de muchos cañones submarinos, así en la porción central del cañón Hudson, donde se sabe que las mareas internas causan corrientes celerísimas. Hay regiones de talud abierto en secciones más profundas que quedan también cerca del ángulo característico de las mareas internas, pero en otras épocas del año. Durante el verano, el ángulo característico coincide con la pendiente del fondo marino sobre gran parte del abanico de detritus del Hudson, una macroexpansión al sur del cañón Hudson donde la erosión es mínima y predomina la deposición de sedimentos. Sería de esperar que las mareas internas ejerciesen su máxima influencia en tales configuraciones. La estrecha correspondencia entre la inclinación del abanico del Hudson y el ángulo característico local sugiere que, en efecto, las mareas internas controlan allí la inclinación del fondo marino.

El talud continental también proporciona en el norte de California alguna prueba importante. En virtud de la deformación tectónica que se está produciendo a lo largo de la costa oeste, hay zonas de la pendiente en las secciones central y meridional de nuestra región occidental de estudio que muestran un relieve conspicuo, reflejo de la elevación y plegamiento tectónicos en marcha, así como de una historia de corrimientos submarinos de tierras. Pese a la confusión que crean esos procesos, secciones del talud descienden entre los 200 y 450 metros de profundidad con el ángulo característico de las mareas internas, o al menos con un ángulo parecido. La intensidad de las corrientes de fondo medidas en esos sectores apunta a que las mareas internas pueden controlar la sedimentación y, por tanto, la forma de al menos parte del talud continental. Es cierto que ahí (y en otros lugares del fondo marino) actúan más procesos. En particular, se sabe desde hace tiempo que los terremotos desencadenan corrientes turbias en ocasiones; esas fangosas afluencias de agua pueden arrastrar una gran cantidad de sedimentos hacia zonas del océano más profundas. Sin embargo, la universalidad del fenómeno y su persistencia a lo largo de tiempos geológicos nos llevan a creer que debe considerarse a las mareas internas un factor primordial entre los que dan al talud continental su configuración general.

Pronto iniciaremos investigaciones en los márgenes continentales de otras partes del mundo para comprobar la correspondencia que hasta ahora hemos venido encontrando entre la pendiente del talud y el ángulo característico de las mareas internas. Creemos que los resultados confirmarán nuestras expectativas, pero debemos estar preparados para algunas sorpresas. Tal vez hallemos pruebas de que el sencillo cuadro deducido de las observaciones de California y Nueva Jersey no es en realidad tan claro. O tal vez la sugestiva correspondencia que hemos visto hasta ahora demuestre su universalidad.

Los autores

David A. Cacchione, doctor en oceanografía en el Instituto de Tecnología de Massachusetts y la Institución Oceanográfica Woods Hole, trabaja en el servicio de la Inspección Geológica de los EE.UU. en Menlo Park. **Lincoln F. Pratson** se formó en la Universidad de Columbia. Hoy enseña en la Escuela Nicholas de Ciencias del Medio Ambiente y de la Tierra de la Universidad Duke.

Bibliografía complementaria

EXPERIMENTAL STUDY OF INTERNAL WAVES OVER A SLOPE. D. A. Cacchione y C. Wunsch en *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 66, págs. 223-239; 1974.

THE SHAPING OF CONTINENTAL SLOPES BY INTERNAL TIDES. D. A. Cacchione, L. F. Pratson y A. S. Ogston en *Science*, vol. 296, págs. 724-727; 2002.

INTERNAL WAVE BREAKING AT CONCAVE AND CONVEX CONTINENTAL SLOPES. S. Legg y A. J. Adcroft en *Journal of Physical Oceanography*, vol. 33, págs. 2224-2246; 2003.

Norbert Treitz

Juegos con espejos planos

¿Por qué cambia el espejo izquierda y derecha, pero no arriba y abajo? Muchos se rompen la cabeza con esto, pero la respuesta es muy sencilla: un espejo no cambia ni izquierda y derecha, ni arriba y abajo. Cuando, como suele suceder, lo tenemos delante, colgado de la pared, cambia delante y detrás. Sentado en la silla de la peluquería, leo —¡correctamente!— ante mí, en el espejo, el letrero que desde la calle se ve pintado en la vidriera del establecimiento. La derecha está a la derecha y arriba está arriba, pero en el espejo se lee la trasera del letrero (*véase la figura 1*). Si usted levanta la mano derecha como para saludar, en el espejo el pulgar estará a la izquierda y la punta de los dedos arriba, igual que al verlos directamente, pero en la visión directa usted tendrá ante sí el dorso de la mano, y en la especular, la palma.

Que inocentemente supongamos que el espejo de la pared cambia derecha e izquierda, se debe a la simetría izquierda–derecha del ser humano (y de la mayoría de los vertebrados). Cuando nuestra imagen especular dirige hacia nosotros nuestra parte frontal, con los pies abajo y la cabeza arriba, la interpretación más simple es que a la izquierda vemos "su" mano derecha. ¿Qué cambio especular hay si estamos sentados en el sofá con un espejo de pared al lado?

La relación entre un objeto y su imagen especular recibe, desde el punto de vista geométrico, el nombre de simetría plana; sólo sería una congruencia real si se pudiera realizar una maniobra a través de la cuarta dimensión, equivalente a plegar una figura plana a través de la tercera dimensión. Herbert G. Wells (1866–1946) describe en su relato fantástico "Plattner Story", de 1896, cómo el corazón acabaría de esa manera en el lado equivocado.

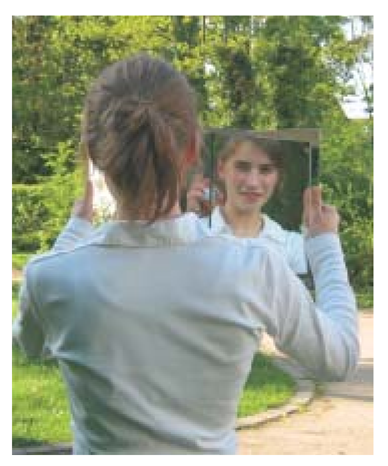


1. También en la imagen reflejada se puede leer correctamente la palabra. Nada extraordinario: en el espejo vemos la parte trasera de las piezas.

Un objeto carente de simetría plana se distingue de su imagen reflejada como la mano izquierda de la derecha. A esta característica se la denomina quiralidad. Cuando la reflexión plana, y con ella el cambio de quiralidad, se ejecuta un número par de veces, se reproduce el original.

Dos espejos en ángulo: Para vernos tal como nos ven las demás, sin la transformación especular, tomemos un número par de espejos —lo más sencillo, dos que sean planos, rectangulares y perpendiculares entre sí— y pongámoslos de tal manera que la recta de intersección de los dos planos sea vertical. La imagen principal que se ve en medio se ha reflejado dos veces y tiene por ello nuestra misma quiralidad, como se puede comprobar con un guiño. Si se gira la arista de intersección alrededor del eje de visión, la imagen girará con rapidez (*véase la figura 2*).

Reflexiones múltiples: ¿Qué sucede si el ángulo entre los dos planos reflectantes es distinto de 90 gra-

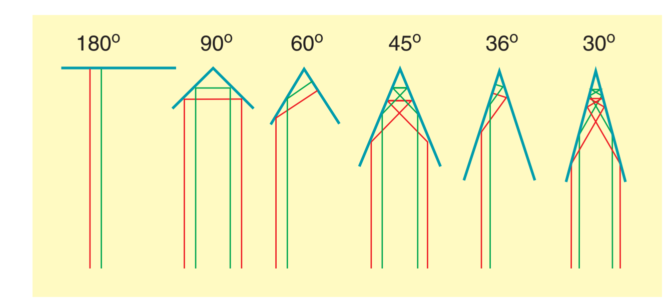






2. Dos esquinas recortadas de una caja de cartulina sirven para pegar dos espejos formando un ángulo recto. La doble imagen especular gira el doble de rápido en torno al eje visual que el espejo mismo.

NORBERT TREITZ (*arriba*); ELKE REINECKE (*abajo*)



3. Recorrido de los rayos para los ángulos 180º/*n* entre dos espejos, con *n* de 1 a 6, cada vez para un rayo rojo y uno verde. Un rayo que incide paralelamente a la bisectriz vuelve justo en dirección contraria, de tal manera que se cambian delante y detrás. Para *n* impar, esto es todo lo que ocurre; la disposición de los espejos produce el mismo efecto que un espejo de pared corriente. Con *n* par, se cambian además derecha e izquierda; la quiralidad vuelve a ser la original. El giro del dúo de espejos alrededor del eje de visión hace girar a doble velocidad la imagen reflejada.

dos? Si se van cerrando los espejos, la siguiente imagen que cuadra se obtiene a los 60 grados. Pero tiene la quiralidad invertida, a pesar del número par de espejos. ¿Razón de ese enigma? En el recorrido de la luz uno de los espejos aparece dos veces mientras que el otro sólo una. Así, la luz se refleja en total tres veces. Pero si se gira el aparato en torno al eje de visión, la imagen reflejada no gira unas tres veces más rápido. ¡No gira de ninguna manera!

Cada vez que el ángulo tome los valores 180º/*n* con valores enteros de *n*, se verá la propia cara, y con una sola nariz. ¿Qué sucede con los giros alrededor del eje de visión? Con *n* impar no gira nada y la quiralidad será igual que la de un espejo en la pared, o sea, "opuesta" a la real. En cambio, para cualquier *n* par, se obtendrá lo mismo que lo ya observado a los 90 grados: una imagen de quiralidad "correcta", que gira el doble de rápido que los espejos.

También se puede utilizar el doble espejo para observar el mismo objeto reflejado una, dos, tres... un sinfín de veces. Si se sitúa un objeto en el espacio prismático limitado por los espejos, aparecerá multiplicado en correspondencia con el ángulo.

Dos espejos paralelos, uno frente al otro, dan lugar a imágenes impresionantes si a uno de ellos se le hace un agujero en medio de la capa reflectante. Un objeto pequeño situado entre ellos aparecerá infinitas veces en fila, alternando la quiralidad correcta y la opuesta. Una pequeña desviación de la posición paralela deformará la fila.

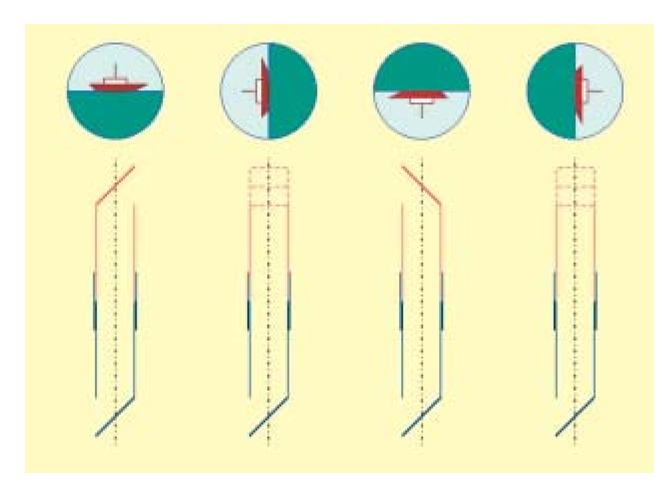
Periscopio: En su forma más simple, el "visor del entorno", por dar una traducción literal de "periscopio", se compone de dos espejos, paralelos entre sí, que desvían la imagen en ángulo recto. Así se puede ver por encima de las cabezas de otros en sentido horizontal sin tener que subirse en una silla, o vigilar el horizonte sobre el agua desde un submarino sumergido. Si se quiere mirar en diferentes direcciones del horizonte, se puede girar entero el periscopio en torno al eje vertical. Pero si el espacio es estrecho, sobre todo en un submarino, sólo gira el espejo superior. Sin embargo, entonces también gira la imagen del mundo exterior en torno al eje visual: al cabo de un cuarto de vuelta la imagen está de lado; tras media vuelta, cabeza abajo.

Para entenderlo, supóngase que el tubo se levanta perpendicularmente y, de momento, que sólo cuenta con el espejo inferior, dispuesto de manera que desvíe la luz 90 grados. Usted mira en este espejo horizontalmente y ve el cielo que hay sobre el tubo. Mueva ahora mentalmente el espejo hasta que quede casi en posición horizontal e imagine que mira en él desde arriba inclinando la vista, de suerte tal que sólo vea el cielo a través del tubo. Lo que usted observará del cielo no habrá sufrido ningún giro, una constelación bien reconocible, digamos, o una letra trazada en el aire por la estela de una avioneta publicitaria. Si ahora da usted vueltas alrededor del tubo y gira consigo el espejo en torno al eje del tubo, la imagen del cielo girará, para usted, en sentido contrario justo una vez por vuelta. Lo mismo sucederá cuando se mire, no desde arriba, sino horizontalmente en el espejo ajustado como corresponda.

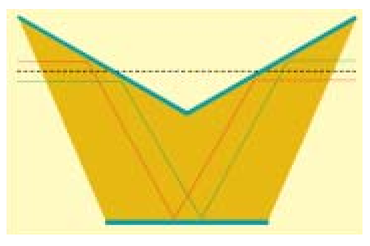
Pero el periscopio tiene arriba otro espejo, que, cuando éste desvía nuestra vista hacia la horizontal, nos ofrece un lugar cercano al horizonte en vez del entorno del cenit. Cuando giramos el espejo inferior alrededor de la vertical y vamos dando la vuelta con él, el horizonte y los objetos que haya en él giran una vez por vuelta en torno al eje visual. Si ahora deja la parte inferior del aparato inmóvil y mira en ella horizontalmente, pero gira el espejo superior en torno a la vertical, tendrá lugar igualmente la rotación de los objetos del horizonte: si usted mira con el periscopio detrás de sí mismo, aparecerá cabeza abajo aquello que estará mirando.

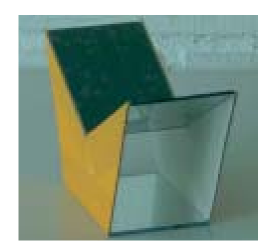
4. El óctuple pingüino está formado por dos espejos con un ángulo de 45 grados (la pareja de espejos regulables pertenece al "Mathematikum" de Giessen); la infinidad de erizos, por dos espejos paralelos.

NORBERT TREITZ/SDW (*arriba*); MATHEMATIKUM GIESSEN/FOTO: ROLF K. WEGST (*pingüinos*), ELKE REINECKE (*abajo*)



5. Así se ve un barco en el horizonte si se giran ambas mitades, una respecto a la otra, de este primitivo periscopio.







6. Al mirar a través del espejo de Amici, se ve al de enfrente cabeza abajo (*izquierda, la pequeña banda encima de la visión directa*). El giro del conjunto de espejos hace que la imagen reflejada rote con doble velocidad (*derecha*).





NORBERT TREITZ/SDW (*arriba y centro*); ELKE REINECKE (*fotografías inferiores*)

Un periscopio de este tipo se puede montar con dos espejos de bolsillo y dos tubos de cartón que se inserten uno dentro del otro.

Tres espejos libres, según Amici: Con tres espejos se puede emular el prisma de inversión de Giovanni Battista Amici (1786–1863), famoso constructor de instrumentos ópticos. En la versión más simple, se pegan tres espejos rectangulares a unas paredes laterales de cinco lados hechas de cartón. Dos personas podrán mirarse mutuamente a los ojos y sin embargo verse cabeza abajo, siempre que se sitúen a lo largo de las rectas que pasan por los puntos medios de los espejos superiores (*véase la figura 6*). Si se giran los espejos alrededor del eje de visión común, ambos se verán rotar, el doble de rápido. Con un giro de 90 grados ya no se cambian arriba y abajo, sino izquierda y derecha; delante y detrás permanecen como antes.

Una esquina especular está formada por tres espejos, con las caras reflectantes hacia dentro, que se encuentran en un vértice como las tres caras contiguas de un cubo. Si se mira con un ojo más o menos paralelamente a la diagonal cúbica, se verá la propia cara girada media vez en torno al eje de visión, con quiralidad opuesta. Aunque se gire algo el trío de espejos, mientras se sigan utilizando aún los tres, no se moverá la imagen, y todavía se seguirá viendo uno mismo en el centro: ideal para narcisistas. El mismo reflejo, justo hacia atrás, se puede conseguir con una reflexión total en prismas. Los “ojos de gato” utilizados en las carreteras funcionan según este principio: cada vehículo recibe buena parte de su propia luz.

El gran caleidoscopio: Se disponen tres espejos grandes (1 m de alto, 1,5 m de ancho, margen inferior de 1 m sobre el suelo) triangularmente y se entra en el recinto que forman encorvado. Al enderezarse se verán muchos individuos, agraciados, qué duda cabe. Entrarán ganas de reflexionar si uno se quiere dejar clonar y exponerse a tanta competencia. La mitad de estos clones —exactamente, uno más de la mitad— tiene la quiralidad invertida. Hasta en la visión del propio cogote los lados están cambiados. Para que los lados aparezcan correctamente, han de ser cuatro los espejos, dispuestos como un cuadrado.

El cubo de interior de espejo es la extensión de este principio: también suelo y techo de la cámara cúbica son espejos. Se verá, en teoría, una retícula infinita tridimensional con una celda elemental, de la cual el cubo es una octava parte (con media arista). Las otras siete son sus imágenes especulares, tres de ellas con quiralidad correcta y cuatro con quiralidad invertida.

Ahí dentro, impresionará especialmente una bombillita que esté pintada mitad de rojo y mitad de verde. ¿De dónde viene, nos preguntaremos, tanta luz, con una sola bombilla? En condiciones normales, sólo le veríamos la luz que entrase en el pequeño ángulo sólido que abarcan nuestras pupilas. Con tantas reflexiones, recibiremos además la luz que emite en otras direcciones.

Juan M.R. Parrondo

Problemas de aparcamiento

Si usted vive en una gran ciudad y comete la imprudencia de ir a un teatro del centro en su propio coche, probablemente se haya encontrado en una situación parecida a la que se muestra en la figura 1. A una cierta distancia de su destino, pongamos 500 metros, ve un lugar para aparcar. ¿Debe aprovecharlo o es mejor continuar y confiar en que va a encontrar un sitio libre más cerca del teatro al que se dirige?

La figura 1 muestra una situación muy simple en donde sólo se puede aparcar en una calle de sentido único, en cuyo extremo se encuentra el teatro. Un coche que alcance el teatro sin haber encontrado aparcamiento debe volver al comienzo por otra calle en la que no se puede aparcar e invierte un tiempo T en dar toda la vuelta. Supondremos también que cada uno de los posibles aparcamientos está ocupado con una probabilidad p, que, desgraciadamente, será cercana a 1.

La situación así descrita no es muy realista, porque normalmente uno se puede acercar o alejar del teatro por varias rutas en las que es posible aparcar. Sin embargo, la obligación de dar la vuelta a la manzana y el tiempo T que se invierte en ello constituye una forma sencilla de penalizar el intento de acercarnos al teatro despreciando sitios libres y nos va a permitir realizar algunos cálculos.

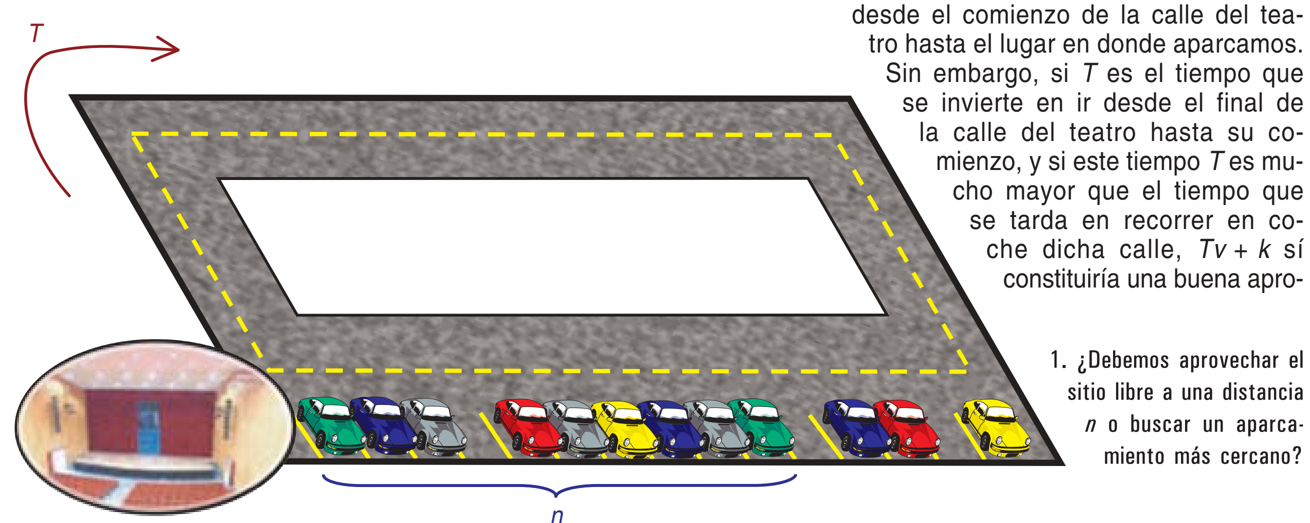
Supongamos la siguiente estrategia: aparcaremos en cualquier sitio que esté a una distancia menor o igual que n del teatro (medida en número de coches, como muestra la figura 1). ¿Cuál es el número n óptimo? Un criterio de optimización razonable es minimizar el tiempo total que tardamos en llegar al teatro. Admitamos que tardamos un segundo en atravesar andando cada posible lugar de aparcamiento y que se tardan $T = 50$ segundos en dar la vuelta en coche a todo el aparcamiento. Hay que andar un poco deprisa para ello, pero esto no afecta a nuestro problema. Se puede de hecho suponer una velocidad menor. Lo único importante es la relación entre el tiempo invertido en dar una vuelta en coche hasta el aparcamiento y el tiempo invertido en recorrer andando los sitios que nos separen del teatro.

Si empezamos a buscar aparcamiento cuando estamos a una distancia n del teatro, la probabilidad de no encontrar ningún sitio es p^n, puesto que ésta es la probabilidad de que los n sitios en donde buscamos estén ocupados. Por otro lado, encontraremos un sitio a una distancia k del teatro si los primeros $n - k$ sitios están ocupados y el siguiente libre. Esto ocurre con una probabilidad $p^{n-k}(1 - p)$, donde k puede ser 1, 2, 3,..., n. Por tanto, la de encontrar aparcamiento a una distancia k después de haber dado v vueltas es:

$$p^{nv}\, p^{n-k}\,(1 - p)$$

en donde v puede ser 0, 1, 2,... Se puede ver que la suma de estas probabilidades a todos los posibles valores de k y v es igual a 1, siempre que p sea menor que 1, lo cual indica que en alguna ocasión debemos encontrar sitio.

Si damos v vueltas y encontramos aparcamiento a una distancia k del teatro, ¿cuál será el tiempo total invertido en aparcar y llegar andando a nuestro destino? Como hemos supuesto que tardamos T segundos en dar la vuelta a la manzana y 1 segundo en recorrer andando cada sitio de aparcamiento, el tiempo total será $Tv + k$ segundos. En realidad, la expresión para el tiempo total es más compleja, ya que deberíamos tener en cuenta el tiempo que pasamos en el coche desde el comienzo de la calle del teatro hasta el lugar en donde aparcamos. Sin embargo, si T es el tiempo que se invierte en ir desde el final de la calle del teatro hasta su comienzo, y si este tiempo T es mucho mayor que el tiempo que se tarda en recorrer en coche dicha calle, $Tv + k$ sí constituiría una buena apro-



1. ¿Debemos aprovechar el sitio libre a una distancia n o buscar un aparcamiento más cercano?

ximación del tiempo total invertido. Supondremos que es esto lo que ocurre, aunque hay que advertir que la figura 1 no representa adecuadamente esta situación, puesto que para ello el recorrido desde el final de la calle del teatro hasta su comienzo debería ser mucho más largo que la propia calle.

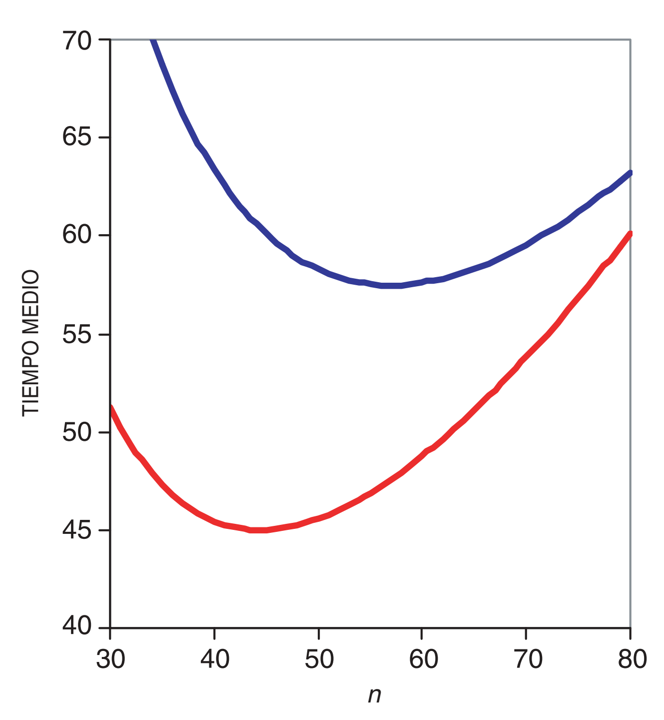
Finalmente, para encontrar el tiempo total medio, tenemos que promediar $Tv + k$ utilizando las probabilidades anteriores para k y v. El cálculo no es sencillo y requiere conocer algunas fórmulas sobre la suma de progresiones geométricas. Sin embargo, el resultado no es excesivamente complicado:

$$t = \frac{Tp^n + n}{1 - p^n} - \frac{p}{1 - p}.$$

En la figura 2 se muestra el tiempo en función de n para $T = 50$, es decir, para cuando invertimos un tiempo en dar la vuelta a la manzana igual al tiempo que tardamos en caminar 50 coches. La curva azul corresponde a $p = 0{,}98$, es decir, a una probabilidad del 2 % de que hay un sitio libre. La curva roja corresponde a $p = 0{,}97$. La estrategia óptima viene dada por el mínimo de cada curva. En el caso $p = 0{,}98$, el mínimo se alcanza para $n = 57$. Es decir, tenemos que despreciar todos los lugares libres que están a una distancia del teatro mayor que 57 coches. Actuando de esta forma, damos un promedio de 0,46 vueltas a la manzana, tardamos en aparcar un tiempo medio de 23,11 segundos y aparcamos a una distancia media de 34,35 coches. El tiempo total es la suma de ambas cantidades, que es 57,46 segundos. Es curioso que una pequeña variación en la probabilidad de que un sitio esté libre altere bastante tales cantidades. Para $p = 0{,}97$ (*curva roja*), el mínimo se alcanza en $n = 45$, se dan, en media, 0,34 vueltas antes de aparcar, tardando un tiempo de 17,02 segundos, y se aparca a una distancia media de 27,98 coches. El tiempo total es entonces 45 segundos.

Es de esperar que, si la probabilidad de encontrar un sitio libre aumenta, entonces el n a partir del cual tenemos que empezar a buscar aparcamiento deberá disminuir. Y así ocurre, porque el mínimo de las curvas pasa de ser 57 a 45. También el n óptimo crece al hacerlo T, ya que en este caso llegar hasta el final de la calle sin haber encontrado aparcamiento tiene una penalización cada vez mayor. La forma concreta en que el n óptimo depende de T y p es bastante complicada, pero, con un poco de manipulación matemática, se puede demostrar que n crece como el logaritmo de T, para una probabilidad p fija.

Como hemos visto, incluso el modelo más simple del problema del aparcamiento presenta complicaciones matemáticas. El problema del aparcamiento recuerda a otro problema clásico: aquel en que alguien debe decidirse entre quedarse con algo o arriesgarse a que aparezca algo mejor. Se trata del problema de *la dote del sultán*. Un sultán decide conceder la mano de una de sus cien hijas a uno de sus súbditos, pero a condición de que supere la siguiente prueba. Las hijas irán pasando, una a una, ante el pretendiente y se



2. Tiempo total medio que tardamos en aparcar y llegar andando al teatro, en función del número n de coches a partir del que comenzamos a buscar aparcamiento. En ambos casos se tarda un tiempo $T = 50$ en dar una vuelta a la manzana. La curva azul corresponde al caso en que la probabilidad de que un sitio esté ocupado es $p = 0{,}98$ y la roja a $p = 0{,}97$.

anunciará la dote que acompaña a cada una de ellas. En cada una de estas ocasiones, el pretendiente tendrá que decidir si se queda con la hija que tiene ante sí o continúa el juego. El pretendiente sólo tendrá el beneplácito para la boda si elige a la hija con la mayor dote.

Las posibles estrategias del pretendiente son muy parecidas a las del buscador de aparcamiento. Tendrá que dejar pasar un cierto número n de hijas y después quedarse con la primera cuya dote sea mayor que la de cualquiera de las anteriores. Si n es pequeño, lo más probable es que se precipite en la decisión pero, si n es muy grande, es muy posible que el pretendiente desprecie a la de mayor dote por salir entre las n primeras. Existe pues un n óptimo que maximiza la probabilidad de elegir a la hija de mayor dote. Se puede demostrar que, para cien hijas, el n óptimo es 37. Es decir, el pretendiente tiene que esperar hasta haber visto a 37 hijas y después elegir a la primera cuya dote sea mayor que las de todas las precedentes (incluidas, por supuesto, las 37 primeras). Con esta estrategia, la probabilidad de acertar es bastante alta, del 37,1 %. Los lectores pueden tratar de resolver este problema. Aunque les advierto de que la solución no es sencilla e involucra algunos conceptos matemáticos no muy conocidos, como los llamados *números armónicos*. Por ello, el próximo mes lo analizaremos con algún detalle.

<parr@seneca.fis.ucm.es>

Mark Fischetti

TECNICAS DE FORMACION DE IMAGENES

Merced a las técnicas de formación de imágenes, los médicos pueden detectar lesiones y diagnosticar enfermedades sin necesidad de recurrir a exámenes externos o a la cirugía exploratoria. En todos los tipos de tomografía, el paciente yace en una camilla dentro de una máquina de forma toroidal; el aparato toma imágenes de numerosos planos corporales y, luego, un ordenador las ensambla en una imagen tridimensional.

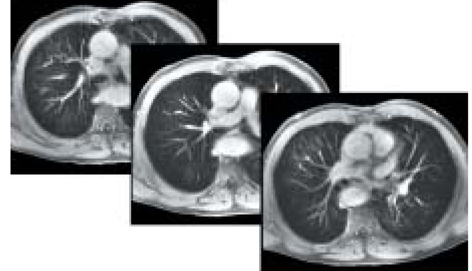
En la tomografía computadorizada (TC), las imágenes se crean mediante rayos X. Reviste gran utilidad para mostrar variaciones en la densidad de los huesos y los tejidos, revelando así fracturas óseas, coágulos sanguíneos y cálculos renales. Para reproducir una sección de diez milímetros de ancho, las primeras máquinas tardaban, en los años setenta del siglo pasado, cinco minutos; hoy, lo consiguen en sólo un segundo y con una resolución de un milímetro. Si el precio y la velocidad de estas máquinas mejorasen sólo un poco, la TC podría reemplazar a la clásica radiografía —que también se sirve de los rayos X, aunque de mayor intensidad.

En la tomografía por emisión de positrones (PET), al paciente se le inyecta una mezcla de glucosa (u otra sustancia de interés metabólico) e isótopos radiactivos que emiten positrones; éstos, al interaccionar con electrones, producen fotones, que se detectan sección a sección. Puesto que el nivel de glucosa guarda relación con la actividad metabólica de un tejido, dichas emisiones revelan una imagen del metabolismo de tejidos y órganos: las zonas de mayor intensidad corresponderán a las regiones del organismo que mayor cantidad de contraste (glucosa) habrán absorbido y, por tanto, las de mayor actividad metabólica. Una actividad anormal puede indicar la presencia de células cancerosas, neuropatías, la malignidad de los tumores o la actividad cerebral durante un proceso mental.

La resonancia magnética (RM) se basa en detectar sutiles fluctuaciones en las propiedades magnéticas del núcleo de átomos de hidrógeno. La imagen resultante muestra las variaciones en la densidad de los tejidos; revela cartílagos rotos, hernias discales, tumores y otras lesiones. La RM funcional detecta la tasa de consumo de oxígeno, señalando así qué neuronas se activan cuando el paciente está percibiendo o pensando.

Conforme la técnica mejora, las máquinas híbridas se apoderan del mercado. Una TC-PET, por ejemplo, puede combinar imágenes para distinguir un bulto canceroso de una simple masa fibrosa. El próximo paso: desarrollar algoritmos que, además de ensamblar una imagen del tejido, valoren su estado.

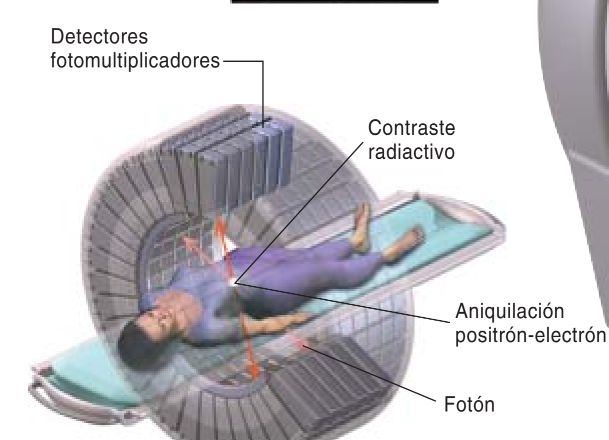
1. TOMOGRAFIA: el equipo toma imágenes de finas secciones transversales de tejido (*abajo, un corazón*). Los programas informáticos combinan luego varias secciones contiguas para formar una imagen tridimensional.



Depósito del refrigerante del imán

Emisor y pantalla de RF

Bobina receptora de RF



2. PET: se administra al paciente un contraste que contiene átomos radiactivos unidos a alguna molécula (isótopos de oxígeno y glucosa) que los tejidos consumen en proporciones variables. Los átomos radiactivos emiten positrones; cuando uno de éstos topa con un electrón, el par se aniquila y emite dos fotones de 511 kiloelectronvolt (keV) a 180 grados. Cuando los fotomultiplicadores, ubicados de forma diametralmente opuesta, detectan a la vez esos fotones que viajan en sentidos contrarios, se define una recta que pasa por la célula emisora. Un gran número de esas rectas especifican la posición de las células en una sección dada y su tasa metabólica. *A la derecha:* células cancerosas en nódulos linfáticos (*arriba izquierda* y *derecha*).



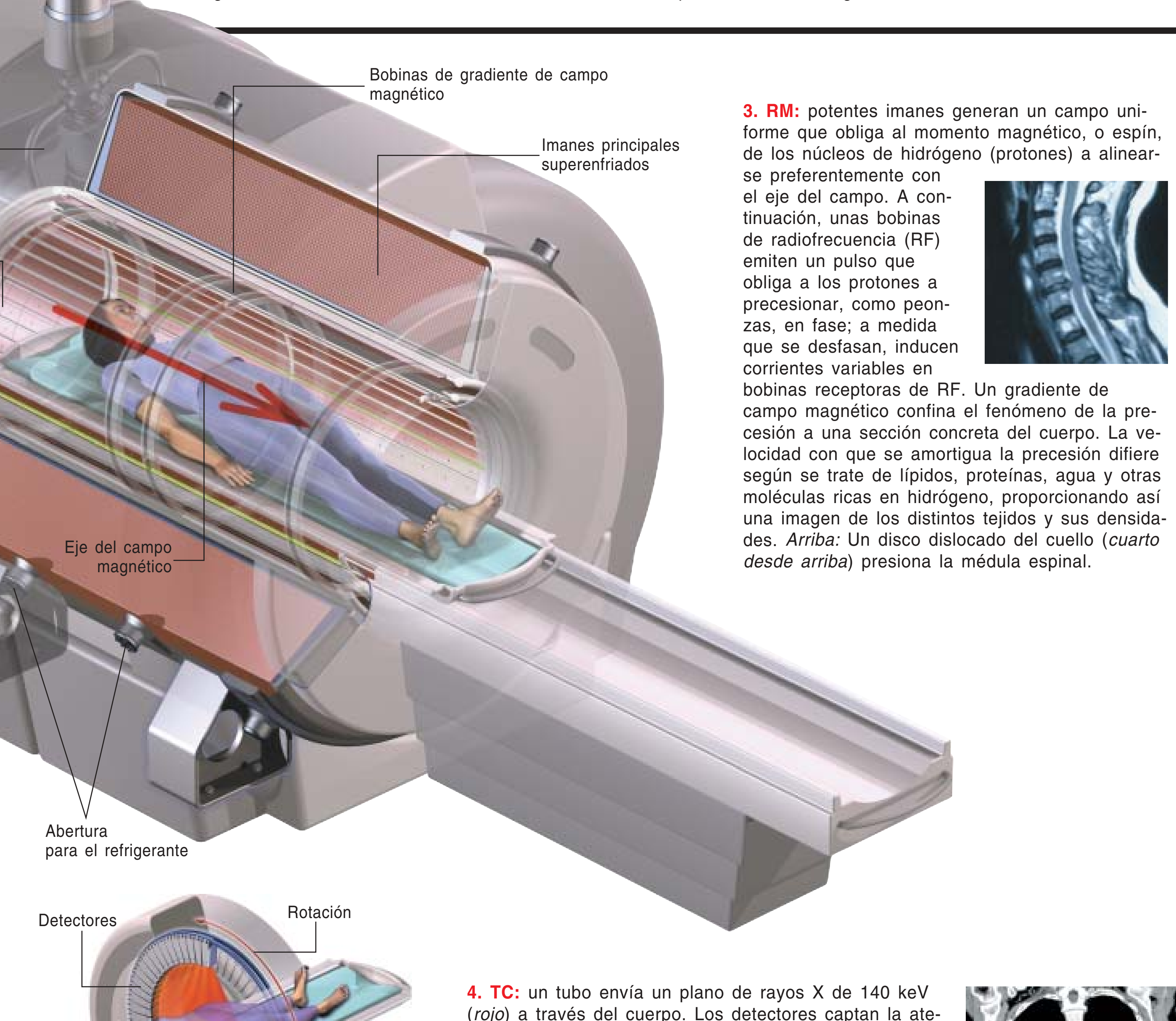
GRIFF WASON (*ilustraciones*); ZEPHYR/SCIENCE PHOTO LIBRARY (*secciones transversales*); REIMPRESO POR breastcancer.org E IMAGEN CORTESIA DE NATIONAL MEDICAL IMAGING, PHILADELPHIA (*PET*); P. MARAZZI/SPL (*RM*); DU CANE MEDICAL IMAGING/SPL (*TC*)

¿SABIA USTED QUE...?

➤ **LIO DE NOMBRES:** Originalmente, la tomografía computadorizada (TC) se denominaba tomografía axial computadorizada (TAC), porque las imágenes se tomaban a lo largo de un plano; pero los aparatos modernos trabajan sobre varios planos, o ejes, lo que invalida el adjetivo "axial". La formación de imágenes por resonancia magnética (RM) empezó como formación de imágenes por resonancia magnética nuclear (RMN), pues detecta cambios en los núcleos atómicos; no obstante, algunos pacientes asociaban el calificativo "nuclear" a la temida radiactividad, por lo que la comunidad médica decidió eliminarlo.

➤ **VISION ELECTRICA:** Un examen mediante resonancia magnética podría algún día especificar qué cadenas neuronales se comunican durante la actividad mental, además de indicar qué células están metabólicamente activas. Michel Joy, profesor de ingeniería biomédica en la Universidad de Toronto, ha desarrollado un método de "formación de imágenes por densidad de corriente", basado en la RM, que detectará la despolarización de las neuronas: cuando éstas abren los canales de la membrana para facilitar el flujo intercelular de iones. Joy también emplea la RM para rastrear la trayectoria de una carga al atravesar los tejidos; ello permitiría detectar cómo la corriente que descarga un desfibrilador cruza un corazón dañado o cómo la estimulación cerebral profunda fluye por el cerebro de un enfermo de Parkinson.

➤ **ULTRASONIDOS:** Un aparato de ultrasonidos en contacto con la piel de un paciente envía ondas acústicas de alta frecuencia al interior del cuerpo y mide los ecos; a partir de éstos crea una imagen móvil de baja resolución, aunque en tiempo real, de órganos internos o de un feto. En ocasiones, sin embargo, la técnica ultrasónica no se considera tomográfica, porque no ensambla imágenes de secciones bidimensionales.



3. RM: potentes imanes generan un campo uniforme que obliga al momento magnético, o espín, de los núcleos de hidrógeno (protones) a alinearse preferentemente con el eje del campo. A continuación, unas bobinas de radiofrecuencia (RF) emiten un pulso que obliga a los protones a precesionar, como peonzas, en fase; a medida que se desfasan, inducen corrientes variables en bobinas receptoras de RF. Un gradiente de campo magnético confina el fenómeno de la precesión a una sección concreta del cuerpo. La velocidad con que se amortigua la precesión difiere según se trate de lípidos, proteínas, agua y otras moléculas ricas en hidrógeno, proporcionando así una imagen de los distintos tejidos y sus densidades. *Arriba:* Un disco dislocado del cuello (*cuarto desde arriba*) presiona la médula espinal.

4. TC: un tubo envía un plano de rayos X de 140 keV (*rojo*) a través del cuerpo. Los detectores captan la atenuación de los rayos, que depende de la densidad de los tejidos que los absorben y desvían. El tubo y los detectores giran en tándem para completar la imagen de una sección. La camilla desplaza el paciente unos centímetros y el proceso se repite, una y otra vez. *A la derecha:* un coágulo de sangre (*justo bajo el círculo central*) en la arteria pulmonar.

Paracelso

Y su tiempo

RUDOLPH AGRICOLA. *LETTERS*. Edición, traducción y notas de Adrie van der Laan y Fokke Akkerman. Royal Van Gorcum-Arizona Center for Medieval and Renaissance Studies; Tempe, 2002.

JOHANNES PHILOPPONUS: COMMENTARIA IN LIBROS *DE GENERATIONE ET CORRUPTIONE* ARISTOTELIS. Traducción de Hieronymus Bagolinus. Introducción de Frans A. J. De Haas. Fromann-Holzbog; Stuttgart-Bad Cannstatt, 2004. DIE DREI GEISTER DES MENSCHEN. DIE SOGENANNTE SPIRITUSLEHRE IN DER PHYSIOLOGIE DER FRÜHEN NEUZEIT, por Gerhard Klier. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 2002.

PARACELSUS. *SEPTEM DEFENSIONES*. DIE SELBSVERTEIDIGUNG EINES AUSSENSEITERS. Edición e introducción de Gunhild Pörksen. Schwabe & Co. AG, Verlag; Basilea, 2003. PARACELSIAN MOMENTS. SCIENCE, MEDICINE, ASTROLOGY IN EARLY MODERN EUROPE. Dirigido por Gerhild Scholz Williams and Charles D. Gunnoe, Jr. Truman State University Press; Kirksville; 2002. CORPUS PARACELSISTICUM II. DER FRÜHPARACELSISMUS. Edición preparada y comentada por Wilhelm Kühlmnn y Joachim Telle. Max Niemeyer Verlag; Tübingen, 2004.

GEORGIUS AGRICOLA. *DE RE METALLICA LIBRI XII*. Introducción general de Agustín Fernández Merino. Círculo Científico-Patrimonio Nacional; Madrid, 2004.

El regusto por la creación científica vino precedido en la Europa central por la afición a las letras. En una forma plástica, antes del humanismo científico que representan los autores recogidos en las obras de referencia hubo una corriente de apertura al mundo clásico en general que podemos simbolizar en la figura eminente Roelof Huesman (*Rudolph Agricola. Letters*). De este holandés nacido en 1444 se nos ofrece, con el rigor crítico al uso, lo que queda de su epistolario: 55 cartas.

Rodolphus Agricola inició su formación en la escuela municipal de Groningen. El Estudio General de Erfurt le concedió, a los 14 años, el grado de bachiller en artes. Culminó esa etapa en Lovaina. Y acometió un fructífero *iter italicum* de diez años de duración, repartidos entre Pavía, donde estudió derecho, y Ferrara, donde aprendió lenguas clásicas. De vuelta a su patria chica, diez años más tarde, fue nombrado secretario de la ciudad de Groningen. Esa misma aventura italiana corrieron belgas y holandeses que llevaron a unos Países Bajos económicamente florecientes, en la segunda mitad del siglo XV, las formas refinadas de cultura que habían traído de Bizancio una oleada de exquisitos exiliados. Las escuelas de Groningen, Zwolle y Deventer y, sobre todo, la abadía de Aduard, se aprestan a emular los centros meridionales.

A las inquietudes de su tiempo responde la bibliografía de Rodolphus Agricola. En 1515 publicó *De inventione dialectica*, manual que gozó de extendido prestigio en las facultades de artes. En la misma onda, a caballo entre los intereses docentes y puramente estéticos, redactó discursos de ocasión, algunos poemas, una vida de Petrarca, traducciones de diálogos griegos, amén de comentarios a Séneca, al *De consolatione Philosophiae* de Boecio y al de *De Lege Manilia* de Cicerón. En todos ellos, y sobre todo en las cartas, se atuvo al precepto humanista de *recte et eleganter eloqui*.

El humanismo científico depura el legado aristotélico en filosofía natural (*Johannes Philopponus: Comentaria in libros De generatione et corruptione Aristotelis*) y galenista en medicina (*Die drei Geister des Menschen. Die sogenannte Spirituslehre in der Physiologie der Frühen Neuzeit*). Por depuración entenderemos aquí la búsqueda de las bases empíricas del conocimiento de la naturaleza que, según se creía entonces, se presentaba con mayor nitidez en los textos aristotélicos del *De generatione et corruptione* y en los *Meteorológicos* que en los *Físicos*. Con ese planteamiento naturalista de la filosofía guarda relación el renovado interés por Alejandro de Afrodisias y su obra psicológica (sobre el alma) y física. Sabido es que Filopón depende de Alejandro en muchos aspectos de su interpretación del pensamiento de Aristóteles y, en particular en estos comentarios (lo cita *nominatim* en 35 ocasiones). Así lo entendieron los responsables de la edición aldina del texto griego del presente comentario: aparecida en 1527, se acompañaba de *De mixtione* de Alejandro y su comentario a *Meteorologica IV*.

Para Filopón, los escritos físicos de Aristóteles reflejan, en su orden, la estructura del reino natural. De las características generales de la naturaleza se ocupa, expone el comentarista, en los *Físicos*, en *De caelo* I-II aborda la parte eterna de la naturaleza, es decir, los cielos y su componente incorruptible (éter), así como las características generales de los elementos sublunares. En *De caelo* III-IV, prosigue, Aristóteles estableció la existencia de generación y corrupción y planteaba la cuestión del número de elementos sublunares involucrados en ambos procesos. La transformación de los elementos no requiere ningún elemento ulterior: preexisten unos en otros potencialmente, mas no

en virtud de elementos anteriores (átomos).

La continuidad natural del *De caelo* es el *De generatione et corruptione*. Para comprender la naturaleza de la generación y la corrupción en cuanto tales, importa precisar de antemano los conceptos fundamentales contacto, acción y pasión, crecimiento y mezcla. Se trata de las cuestiones debatidas en el libro primero del *De generatione et corruptione*. El segundo recupera el tema sobre cómo los cuatro elementos advienen a la existencia, procediendo unos de otros, y apela a las cualidades en cuya virtud se producen tales cambios (seco, húmedo, frío, caliente). Sólo entonces Aristóteles se siente facultado para alcanzar una conclusión final sobre el número de elementos sublunares: ni más ni menos de cuatro.

Distinguía Aristóteles entre cambio sustancial, propio de la generación y corrupción, que comporta la formación de una nueva entidad, y el cambio accidental, que sólo alteraba la condición del individuo. En ese marco debe entenderse el *dictum* aristotélico de que la naturaleza no hace nada en vano, vale decir, no opera nada que vaya en contra del organismo Puesto que la naturaleza no hace nada *dañino*, no puede ser tampoco responsable del cambio sustancial, de su autodestrucción. Por la misma razón, la alteración tiene una causa externa, puesto que los estados excesivos de determinadas cualidades son destructivos. Todo cambio, además, afirmaba Aristóteles, presupone siempre un contacto entre el agente y el paciente. Eso vale, añade Filopón, para la causalidad del motor inmóvil y el quinto elemento, el éter, del que están hechos los cielos.

Además de los cuatro elementos, que permitían su generación y desarrollo, los seres vivos presentan un elemento distintivo, el alma, una en su constitución y plural en sus manifestaciones dinámicas. Para conocer el estado de esa cuestión espinosa donde las haya nos vale la guía documentada de Klier, que resume la fisiología y la antropología en el Renacimiento. Abundaban, en palabras ajustadas de Harvey, *speciosa verba* (espíritus, calores innatos), que obscurecían el significado de lo descrito.



Retrato de Rudolph Agricola (1444-1485)

La "Spirituslehre" renacentista viene de lejos. Platón distinguía tres géneros de alma, a cada uno de los cuales le correspondía una facultad (*dynameis*). La trilogía en cuestión constaba de una parte mental (*logistikon*), otra emocional (*thymoides*) y una tercera germinativa (*epithymetikos*). Aristóteles, por su parte, investiga el nexo entre cuerpo y alma. El hombre es, también, un compuesto de materia y forma. La forma actualiza las potencialidades de la materia, que se presenta a través de la combinación de los cuatro elementos. Los elementos amasan sustancias similares (*homoiomeren*), a partir de cuya combinación aparecen sustancias disimilares, partes del cuerpo que cumplen una función determinada. (La mano, por ejemplo, se compone de las siguientes *homoiomeren*: huesos, carne, nervios, vasos.)

Para Aristóteles el alma es, a un tiempo, causa y principio (*aitia* y *arché*). En cuanto principio formal, actualiza la masa corporal. Hay tres potencias o *dynameis* genuinas (vegetativa, sensitiva, cognitiva) que se corresponden con tres actividades dirigidas: el desarrollo y la nutrición pertenecen al alma vegetativa (*psyche threptoke*), percepción y movimiento al alma sensitiva (*psyche aisthetike*) y la comunicación al alma intelectiva (*psyche logistike*).

En la anatomía y fisiología de Galeno, la doctrina del alma se articula con la teleología aristotélica y con la división platónica del alma. Su doctrina del pneuma se fundaba en una visión tripartita de las potencias ínsitas en el cuerpo. La primera era la *vis animalis*, originada en el hígado y desde allí se difundía por las venas. La segunda, o *vis naturalis*, era la responsable del calor interno; tenía su sede en el corazón y cursaba por las arterias. La tercera potencia era la *vis psiquica*, que operaba en los nervios. Así se argumentaría hasta bien entrado el Renacimiento.

También en la obra de Paracelso la doctrina del espíritu desempeña un papel central. En su tesis de la quintaesencia, el hombre es una suerte de extracto o decantación estelar del espíritu. En efecto, puesto que el sexto día el Creador tenía todo el material del mundo, le bastó con sacarlo de lo constituido, un "extracto" es la palabra alquímica. En la alquimia paracelsista, se reconocía la existencia de una correspondencia unívoca entre el "espíritu del fármaco", su extracto, y el "espíritu" del individuo. Pero Theophrastus von Hohenheim (*Paracelsus. Septem Defensiones*) no sólo se oponía con ello a la teoría humoral definidora del galenismo, sino que se situaba también en los antípodas de la filosofía natural aristotélica. En su rebeldía contra todo lo instituido y su mezcla de intuición química con superchería crédula en ninfas y espíritus de los bosques, sintetiza los signos de contradicción que caracterizan una época de cambios profundos.

De la vida de Paracelso (Einsiedln an der Sihl, 1493 – Salzburgo, 1541) nos ha llegado escasa información. En 1509 estudió filosofía en la Uni-

versidad de Viena y alquimia con el abad Tritemio de Einsiedeln, monasterio del que su padre era médico. En 1514 fue aprendiz en una mina de los Fugger en el Tirol, donde adquirió conocimientos prácticos de química, mineralogía y metalurgia; recorrió Alemania, Francia, España e Italia; en 1512 estudió medicina en Ferrara (doctor en medicina en 1516); en 1520 marchó a Estocolmo como traumatólogo del ejército de Cristián II; tras efectuar nuevos viajes (hasta Moscú y Constantinopla), fue en 1526 médico en Estrasburgo. Desde mediados de marzo de 1527 hasta febrero de 1528 ejerció en Basilea. La ciudad, convertida en emporio editorial, respiraba una agitada atmósfera de catolicismo académico y reforma protestante en el seno de la clase media. Igual que en otros muchos intelectuales, Erasmo incluido, no flaqueó su fe católica, pero reclamaba un abandono explícito de la *Mauerkirche* ("iglesia amurallada") por una conducta más evangélica. A su llegada a Basilea, Paracelso cosechó un éxito notable al curar la pierna herida del famoso impresor Johannes Froben. A raíz de ese triunfo, se ganó el respeto de la ciudad.



Paracelso (1493-1541)

Se creó un puesto para él en la universidad. Dictaba las clases en alemán, introdujo principios químicos en la medicina y fundó su propio sistema terapéutico basado en tres principios básicos (mercurio, azufre y sal); exploraba los remedios químicos y, se dice, quemó el *Canon* de Avicena, compendio del galenismo arabizado, en la plaza pública el día de san Juan. Bastó que el influyente Froben muriera, para que la universidad de Basilea se volviera en su contra y tuviera que huir. Ese sino errante le acompañará hasta la muerte. (En 1540 fue llamado por el obispo de Salzburgo a esta ciudad, donde fue asesinado en 1541.) Cuando ésta se produjo, sólo había visto la luz una fracción minúscula de su inmensa obra escrita.

Cumple al médico dominar las ciencias o pilares sobre los que se apoya su disciplina: filosofía, astronomía y alquimia. A esos tres debe sumarse una cuarta columna, la rectitud de mente, que se fundamenta en Dios y se le presenta a través de la naturaleza. Con estos cuatro pilares, expone en *Paragranum* (1530), el médico estará capacitado para reconocer y curar las enfermedades. Rechaza la patología humoral dominante, con la doctrina de los grados, para promover, en su sustitución, el conocimiento del hombre interior y exterior. Compendia el hombre el contraste entre lo grande y lo pequeño (macrocosmos y microcosmos); la anatomía interna y externa le enseña al médico el camino del tratamiento. Ni elementos ni fluidos determinan una enfermedad, sino el astro encerrado en el hombre como principio ideal (la enfermedad corresponde al ser del hombre; se trata de una concepción ontológica de la enfermedad). De los astros externos proceden los remedios curativos, que se le ofrecen al médico en la naturaleza. Hace, pues, intervenir, el zodiaco y los planetas. Establecía el esquema siguiente de correspondencias entre macrocosmos, quinta esencia y microcosmos: Saturno; plomo, bazo; Júpiter, zinc; hígado; Marte, hierro, bilis; Sol, oro, corazón; Venus, cobre, riñón y genitales; Mercurio, mercurio, pulmones; Luna, plata, cerebro.

Seis años más tarde publicó su magna obra quirúrgica *Grosse Wundarznei*. (1536). En su confusión pertinaz de datos objetivos con puras lucubraciones, admitía la necesidad de reformar la medicina, si bien creía que corregir los abusos no era tarea de los mortales. La medicina decía que había caído en un estado de apostasía y deshonor. Sin embargo, no hay mal que por bien no venga; los prácticos inútiles cumplían una finalidad, a imagen de la coexistencia bíblica de verdaderos y falsos profetas.

Las *Siete defensas* (1538), uno de sus últimos escritos, se suman a la larga tradición de apología, la socrática la más famosa. Allí se explaya con mayor extensión que en ninguna otra parte. Habla de sus inquietudes, sus sentimientos y soledad, de su conocimiento de la naturaleza de la persona humana, de su vida errante, de su compromiso cristiano como médico. Argumenta su idea de la naturaleza y del mundo. Indica por qué fundamenta la medicina en la relación entre el cuerpo y el cosmos, establece una nueva terminología médica y pergeña una imagen inédita de la enfermedad, la psiquiátrica incluida. Se defiende contra los reproches de envenenamiento con sus remedios alquímicos y acuña la expresión de que "la dosis hace el veneno". Se abona al principio de la experiencia de la naturaleza y anda tras la búsqueda de un giro radical en el que la medicina se funde en Cristo. Desarrolla el principio de la homeopatía ("lo similar cura lo similar") y lo generaliza a la nutrición y absorción. E introduce su idea peculiar sobre el tiempo. No lo considera una entidad abstracta, ni una magnitud, constante o lineal. Existen tiempos, ritmos y ciclos propios. A eso le llama *monarchia*. Cada objeto natural es señor en su propia casa, controla su propio espacio-tiempo. Un manzano presenta la noción de *monarchia* visible ante los ojos. En razón de las propias condiciones, en su propia relación con el cosmos, en su propio tiempo, desarrolla retoños, hojas, flores, frutos, semillas.


LIBER NONVS. 341

At ars hoc modo ferrũ igni & additamentis perficit, et ex eo efficit aciem, quã Græci σόμωμα nominãt. Eligatur ferrũ, quod ad liqueſcendũ eſt aptum: F 3 & præ

Página del impreso de *Re Metallica*, coeditado por Patrimonio Nacional y Círculo Científico.

Aunque habrá que esperar al empeño titánico de Karl Sudhoff y Kurt Goldammer, en la primera y segunda mitad respectivamente del siglo pasado, para disponer del corpus en edición crítica exigente, la publicación que realizaron sus discípulos de sus escritos sobre la elongación de la vida, el guayaco o su medicina cosmológica (*Astronomia magna*), aglutinó una cohorte de seguidores dispersos (*Paracelsian Moments*, *Corpus paracelsisticum II*). La primera generación de quimiatras paracelsianos la integraban Adam von Bodenstein, Michael Schütz (Toxites), Gerhard Dorn, Martin Ruland y su hijo Martin Ruland el joven. Michael Toxites, Adam von Bodenstein y Gerhard Dorn recorrieron Europa en busca de manuscritos de Paracelso.

De perfiles harto borrosos, suelen los historiadores convenir en ciertas notas definidoras del movimiento paracelsista. En primer lugar, la adhesión a los principios doctrinales de Paracelso, sumamente nebulosos en múltiples ocasiones; en segundo lugar, y quizás el factor determinante, el empleo de medicinas químicas, y, a modo de corolario, rechazo de la primacía de Aristóteles y Galeno en filosofía natural y medicina. En cualquier caso, la tradición paracelsista, que arranca del decenio de 1570, se propuso inscribir a su maestro en la estela de los grandes teóricos alquimistas españoles Ramon Lull y Arnau de Vilanova. Junto al fervor partidista, surge otra corriente de fondo antagónica y representada por Thomas Erastus, autor de unas extensas *Disputaciones* contra la medicina de Paracelso. Este profesor protestante de la Universidad de Heidelberg construye, a través de una selección tendenciosa de sus fuentes, una biografía demoledora que subrayaba las creencias herético-demoníacas de Paracelso, sus hábitos independientes y disolutos y sus terapias médicas letales.

No podemos deslindar el éxito de los remedios químicos del desarrollo contemporáneo de la minería y metalurgia. En ellas se inspiró el propio Paracelso. Su nombre, sin embargo, va asociado al de Georgius Agricola (*De re metallica libri XII*), quien supo dotar de coherencia científica a los conocimientos, empíricos y dispersos, de los mineros de su tiempo.

Georg Bauer (Glauchau, 1494 –) estudió artes liberales en la Universidad de Leipzig. Tras unos años de docencia de lenguas clásicas y la publicación, en 1520, de *De prima ac simplici institutione gramatica*, comenzó a estudiar medicina en Leipzig bajo la dirección de Heinrich Stromer von Auernach. Prosiguió la carrera en Bolonia, Venecia y Padua. Por su preparación humanística compaginó el estudio con la

Matemática contemporánea

THE MATHEMATICAL CENTURY. THE 30 GREATEST PROBLEMS OF THE LAST 100 YEARS, por P. Odifreddi. Prólogo de Freeman Dyson. Princeton University Press; Princeton, 2004.

El año 2000 fue declarado Año Mundial de las Matemáticas. Odifreddi, autor del excelente *Classical Recursion Theory*, aprovechó la ocasión para hacer una crónica de la matemática en el siglo XX que, editada en el 2000 en italiano, aparece aquí traducida al inglés. En crecimiento exponencial, en la matemática del siglo XX se elaboraron más teorías y se demostraron más resultados que en todas las épocas precedentes juntas con un proceso de superespecialización que hace realmente difícil captar los núcleos básicos de la misma. Para orientarse en la masa de resultados, métodos e ideas, Odifreddi ha seguido dos criterios: adoptar los 23 problemas enunciados por Hilbert en 1900 como guía hasta los años treinta y tener presente los premios Fields, equivalentes en cierto modo a los Nobel, como los puntos relevantes para la segunda mitad del siglo. Con lo cual focaliza su atención en algunos "grandes problemas" y así la exposición aparece como un *collage* —son sus palabras— con secciones independientes entre sí, a pesar de la unidad subyacente que existe en muchos de los campos aquí escindidos que le obligan a continuas referencias cruzadas.

Un enfoque que le lleva a estructurar el libro en cinco Capítulos: el 1 dedicado a los fundamentos, en lo que estima cuatro grandes momentos: los años veinte Conjuntos, los treinta Estructuras, los sesenta Categorías, los ochenta Funciones. El capítulo 5, Problemas abiertos, esboza cuatro de los problemas a ser resueltos en este siglo: el de los números perfectos, la hipótesis de Riemann, la conjetura de Poincaré y la teoría de la complejidad.

El núcleo central viene dado por los capítulos 2, 3, 4 en los cuales hace un recorrido por lo que considera los 30 problemas básicos de la matemática en el siglo XX. Problemas clasificados en tres bloques: matemática pura —15 problemas— en el que se va desde el análisis, álgebra, topología y teoría de números de los primeros años del siglo, con la medida Lebesgue o el problema del punto fijo por ejemplo, hasta los mismos campos, pero ya a finales del siglo con nuevas técnicas e ideas, donde cabe mencionar la clasificación de grupos finitos y la de las superficies tridimensionales, la demostración de Wiles del Ultimo Teorema de Fermat (1995) o la referencia a la geometría discreta y la solución de Hale (1998) al problema de Kepler. Matemática aplicada —10 problemas— con cuestiones sobre cristalografía y los grupos de simetría de Bieberbach, cálculo tensorial, teoría de juegos hasta los invariantes Jones de 1984. El tercer bloque lo centra en la matemática y el computador —cinco problemas—, donde se habla de la teoría de algoritmos y la caracterización de Turing, inteligencia artificial, teoría del caos, demostraciones asistidas por computador —con el ejemplo del problema de los 4 colores— y los fractales de Mandelbrot.

En perspectiva personal este libro ofrece una sucinta historia del origen y evolución de los problemas por él elegidos e insiste en la aportación de algunos matemáticos —los medallistas Fields— en dicha historia. Odifreddi ha tenido el valor de intentar una perspectiva del hacer matemático del siglo XX con todos los riesgos que supone dada la amplitud del tema y las especialidades que el mismo entraña. Muy amenamente escrito y editado es libro recomendable para todos quienes aman el hacer matemático. Por su parte, el físico Dyson, en el prefacio, señala la visión excesivamente cartesiana o racionalista del enfoque de Odifreddi frente a lo que considerar "momentos de sorpresa" que tienen lugar en todo proceso epistémico.

—Javier de Lorenzo

edición aldina de los textos de Hipócrates y Galeno. De 1527 a 1530 ejerció la medicina en la población minera Joachimstal.

Demuestra los conocimientos adquiridos en esa labor con su primera obra sobre metalurgia, *Bermannus sive de re metallica dialogus* (1530), considerada, asimismo, el punto de arranque de la mineralogía. Aunque con distanciamiento crítico, se apoya en los clásicos de la antigüedad y medievales para la confección de un léxico básico, en el que se impuso nombre y se describió cada metal y mineral. En los clásicos bebe también para su incursión en el campo de la metrología con la impresión, en 1533 del *De ponderibus et mensuris*.

Con el avance en las técnicas y procedimientos metalúrgicos del siglo XVI (introducción de hornos de fundición y de mecanismos de bombeo y ventilación), Agricola, que viaja, vista plantas de función y anota, va creándose una idea cabal de la naturaleza de la Tierra y sus entrañas. Va depurando sus nociones y definiciones. Así, en *De natura fossilium* (1546) encontramos la siguiente definición de metal: "Un metal es un cuerpo mineral natural, líquido o sólido y se funde al fuego. El metal fundido, al enfriarse se torna a endurecer y retorna a su forma original. La piedra fundida se torna dura al enfriarse, pero no vuelve a su forma y figura originales." Ofrece allí también la primera clasificación del reino mineral. Dividía los minerales en cuerpos homogéneos y mezclas; los homogéneos se repartían, a su vez, en minerales simples y minerales compuestos; los minerales simples se subdividían en tierras, jugos solidificados, piedras y metales.

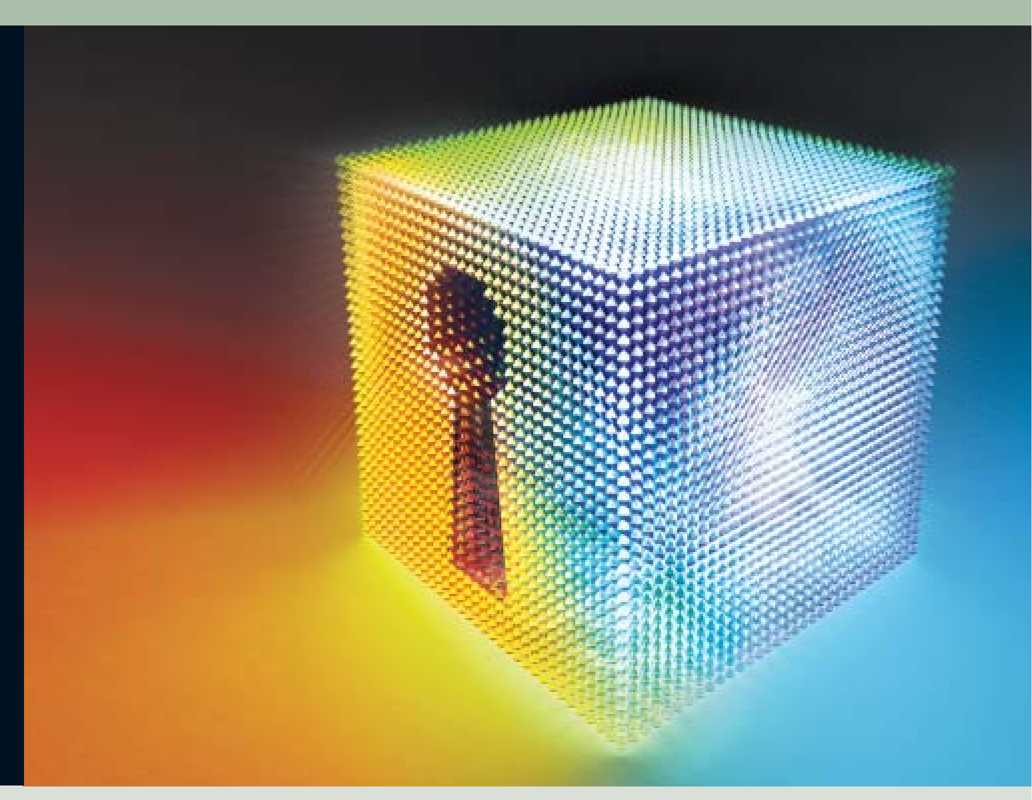
El punto culminante de su progresión se nos presenta en *De re metallica libri XII*, de 1556. Establecida la clasificación de los minerales, aporta ahora una clasificación de las sales. Desde el punto de vista químico también, reforma la nomenclatura técnica, ahormando la nebulosa alquímica. De los 11 minerales de plata conocidos en 1556, siete habían sido descubiertos y nombrados por Agricola. Describe procesos (la copelación, entre ellos), instrumentos, máquinas y labores, retratados en preciosas imágenes, casi trescientas xilografías dibujadas por Basilius Wefring y grabadas en madera por Hans Rudolf Deutsch.

—LUIS ALONSO

EN EL PROXIMO NUMERO...

...DE MARZO 2005





CRIPTOGRAGRAFIA CUANTICA,
por Gary Stix

Este método de encriptación, tras pasar de la mera teoría al laboratorio, se materializa ahora en productos comerciales.



EL MITO DE LA AUTOESTIMA,
por Roy F. Baumeister, Jennifer D. Campbell, Joachim I. Krueger y Kathleen D. Vohs

Fomentar la autoestima no mejora el rendimiento académico ni desalienta la mala conducta.



EL OJO DEL OBSERVADOR,
por Emily Harrison

Las imágenes de un concurso de microfotografía nos exhiben bellezas que el ojo no puede captar.

GEOMETRIA NO CONMUTATIVA Y ESPACIOTIEMPO CUANTICO, por José Fernández Barbón

Resultados recientes de la teoría de cuerdas sugieren los primeros modelos de la estructura cuántica del espacio y el tiempo matemáticamente consistentes.

EL VIRUS DE LA GRIPE DE 1918, por Jeffery K. Taubenberger, Ann H. Reid y Thomas G. Fanning

Se ha conseguido resucitar la cepa del virus de la gripe más mortífero que haya habido. Así se quiere saber cómo mató a millones de personas y evitar que medren variantes tan letales como aquélla.

